

文章编号: 1000-7032(2019)03-0349-08

不同发光半角的圆形 LED 阵列辐照特性

张玉宝¹, 董 礼^{1*}, 张国英²

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010; .

2. 鄂尔多斯市莱福士光科技有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为了探究不同发光半角对圆形 LED 阵列辐照特性的影响, 利用单颗 LED 芯片的照度公式推导出圆形阵列的照度公式、光斑半径和发散角公式。使用 Tracepro 软件对不同发光半角的圆形 LED 阵列仿真并利用 MATLAB 进行函数数值拟合。结果表明: 在有效光斑区域下, 随着单颗 LED 发光半角的增大, 圆形阵列的中心照度值逐渐降低, 降低的速率近似线性增长; 光斑半径和发散角逐渐增大, 变化率先增大后减小。辐照均匀度随着单颗 LED 发光半角的增大而增大, 而后保持稳定, 单颗 LED 发光半角为 60° 时, 圆形阵列辐照均匀度最好, 且相同发光半角时接收面面积越小辐照均匀度越高。这些结论对实现圆形 LED 阵列照明设计提供了定量的参考和理论依据。

关键词: 发光半角; 圆形阵列; 有效光斑半径; 发散角; 辐照均匀度

中图分类号: TN256; O432.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194003.0349

Radiation Characteristics of Circular LED Arrays with Different Illuminant Half Angles

ZHANG Yu-bao¹, DONG Li^{1*}, ZHANG Guo-ying²

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Erdos City Raffles Light Technology Co. Ltd., Ordos 017000, China)

Corresponding Author, E-mail: yuzubinglei@163.com

Abstract: In order to investigate the influence of different luminous half angles on the radiation characteristics of circular LED array, the formula of illuminance, radius of spot and divergence angle of circular array are derived by using the illuminance formula of single LED chip. The Tracepro software is used to simulate the circular LED arrays with different luminous half angles, and MATLAB is used to fit the function values. The results show that, under the effective light spot area, with the increase of the single LED luminescence half angle, the central illuminance value of the circular array decreases gradually. The rate of the decrease is approximately linear, the radius of the spot and the divergence angle increase gradually, and the change first increases and then decreases. The radiation uniformity increases with the increase of the single LED luminescence half angle, and then keeps stable. The radiation uniformity of the circular array is the best when the single LED luminescent half angle is 60°, and the smaller the area of the receiving surface is, the higher the uniformity is. These conclusions provide a quantitative reference and theoretical basis for realizing the circular LED array lighting design.

Key words: luminous half angle; circular array; effective spot radius; divergence angle; irradiation uniformity

收稿日期: 2018-05-21; 修订日期: 2018-08-06

基金项目: 2016 年国家火炬计划(2015GH051184)资助项目

Supported by 2016 National Torch Program(2015GH051184)

1 引 言

发光二极管(Light emitting diode, LED)作为第四代照明光源具有节能、环保、体积小、抗震性好、寿命长等优点,被广泛应用于各种照明领域,如显示器中的背光源、路灯以及室内照明等^[1-4],在理论上对 LED 这种新型光源照明特性的研究也越来越受到关注。

由于受制造技术和工艺水平限制,单颗 LED 的功率极为有限,限制了其在多数照明领域的应用^[5]。LED 阵列已经广泛地应用在实际的生产生活中,最常用的阵列为圆形 LED 阵列,其具有中心辐照度高且辐照均匀性好的特点。在实际的圆形 LED 阵列的照度特性研究及其应用中,以前学者们主要研究的是 LED 圆形阵列和方形阵列照度均匀性与结构参数的关系。王加文^[6]采用模拟退火算法对 LED 圆形阵列、矩形阵列进行优化,圆形阵列的最佳半径与 LED 颗数无关,矩形阵列相邻 LED 之间的最佳距离与阵列面和目标面之间的距离呈线性关系;赵芝璞^[7]推导了 LED 圆形阵列和方形阵列照度分布函数,采用粒子群(PSO)算法来优化平面随机分布的 LED 阵列结构,使其在目标光照平面上光照分布均匀;阙笑语^[8]利用模拟退火的算法,使 LED 阵列照明曲面目标面(圆柱形曲面、抛物形曲面和正弦型曲面)产生均匀的照度分布。

目前影响圆形 LED 阵列辐照特性的因素还存在两个问题有待进一步深入研究:一是对光斑半径的大小没有做准确的定义,导致得出的圆形 LED 阵列辐照特性的结果不是特别可靠;二是没有考虑到单颗 LED 发光半角对辐照特性的影响,其中的辐照特性包括中心照度、光斑半径、发散角和辐照均匀性等参数。市面上常见的 LED 不全是标准的朗伯光源,而是近朗伯光源分布,所以对不同发光半角的 LED 研究很有价值,本文将对以上两个方面展开进一步的分析和探究。

2 理论与模型的建立

理想情况下,单颗 LED 光源是近似朗伯光源,即 LED 的光强分布是观察角的余弦函数^[9]。实际上由于封装和芯片形状的原因,其照度分布为观察角余弦多次方的函数,照度的实际分布为:

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

其中 θ 是发光角度, E_0 是轴向与 LED 距离为 r 处的照度值。 m 值取决于芯片相对于 LED 封装透

镜曲面中心的距离。如果芯片位置与曲面中心对应一致,则 $m \approx 1$, 光源近似为一个完美的朗伯光源。 m 的取值可以通过发光半角 $\theta_{1/2}$ (发光强度值为轴向强度值一半时发光方向与光轴之间的夹角)来确定^[10]:

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

当发光半角不同时,对应的 m 值如表 1 所示。

表 1 不同发光半角对应的 m 值

Tab. 1 Corresponding m values for different luminous half angles

$\theta_{1/2}/(^{\circ})$	m
7.5	80.7
15	20
30	4.82
45	2
60	1
75	0.52

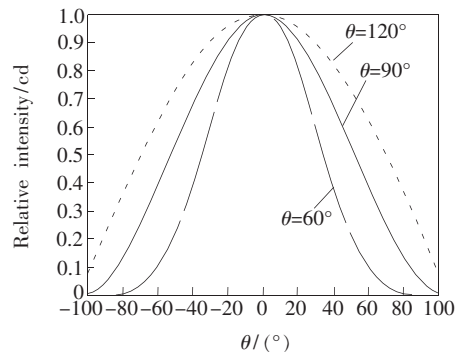


图 1 相对矩形光强分布图

Fig. 1 Rectangular relative intensity distribution

图 1 是发光角度为 60° 、 90° 、 120° 对应的矩形光强分布。

而实际中常采用极坐标的配光曲线的形式,图 2 依次为利用 Tracepro 模拟的 $7.5^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 的近朗伯型的 LED 配光曲线。

当 LED 照射到与其光轴方向垂直的平面时,在该平面上光照度分布与 LED 空间光强分布由公式(3)确定,是非理想朗伯体光源^[11-13]:

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

将公式(3)用直角坐标系表示,则 xy 平面内的 LED 光源照射到目标平面上任意一点 $P(x, y, z)$ 的辐照度可表示为:

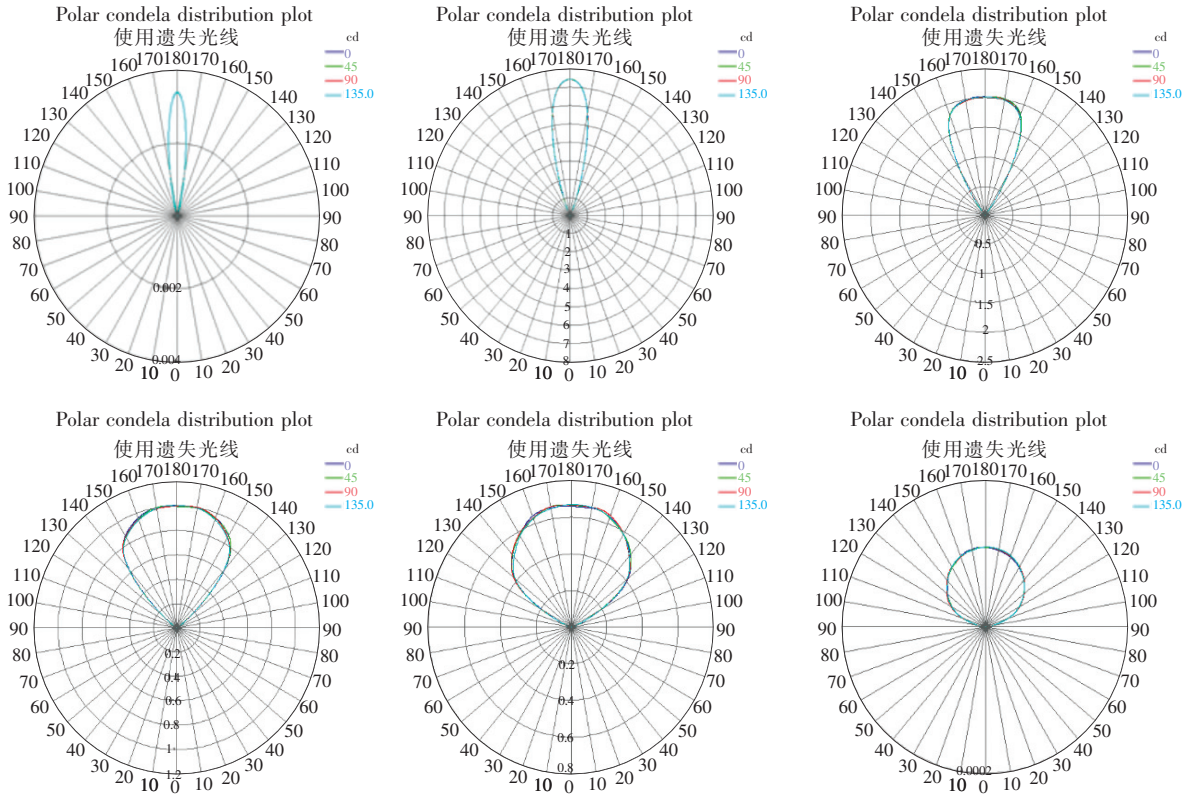


图 2 7.5° ~ 75°极坐标下的配光曲线

Fig. 2 Light distribution curve in 7.5° - 75° polar coordinates

$$E(x, y, z) = z^m I_0 [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2]^{-\frac{m+2}{2}}, \tag{4}$$

其中, (x_0, y_0) 为 LED 分布在 xy 平面上的坐标, z 为发光面距离接收面的距离, 对于圆形 LED 阵列, 排布方式如图 3 所示。假设圆形阵列上有 N 颗 LED ($N \geq 3$), 由于 LED 是非相干光源^[14], 目标面上的照度为单个 LED 照度的线性叠加, 即 P 点的照度是圆形阵列上多颗 LED 共同照射叠加的结果, 由公式(4)得到 P(x, y, z) 点的照度为:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{R - r_N}{z}. \tag{7}$$

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N \frac{Z^m I_0}{\left[\left(x - r \cos \frac{2\pi n}{N} \right)^2 + \left(y - r \sin \frac{2\pi n}{N} \right)^2 + z^2 \right]^{\frac{m+2}{2}}}, \tag{5}$$

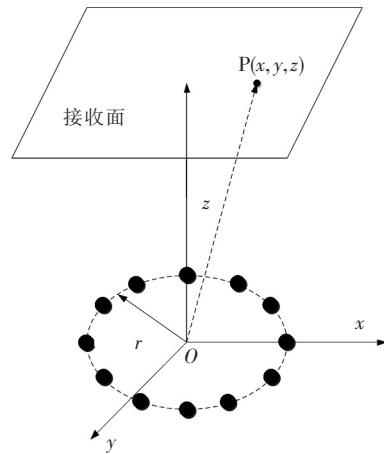


图 3 LED 圆形阵列模型

Fig. 3 LED circular array model

依据国际照明学会 (IES) 规定, 截取法向光强 10% 作为被照面有效光斑区域, 所形成的夹角为发散角。故本文选取 $0.1E_0$ 作为被照面光斑边界, 即

$$E \geq 0.1E_0, \tag{6}$$

通过公式(6)可得光斑半径 R, r_N 为圆形阵列最大圆周半径, 圆形 LED 阵列的发散角 α 可表示为:

3 圆形阵列发光特性与单颗 LED 发光半角的关系

初始条件的设定: 本文中采用圆形阵列的 LED

个数为 12 个,均匀分布在 $r_N = 0.15 \text{ m}$ 的圆周上,接收面设定为半径为 1.784 m 、面积为 10 m^2 的圆盘。LED 发光面距离接收面距离 $z = 1 \text{ m}$,LED 光源定义为面光源,单颗 LED 的半径为 0.015 m ,厚度为 0.01 m ,光源的发光半径也为 0.015 m ,光通量定义为 0.1 lm ,具体的发光模型如图 4 所示。

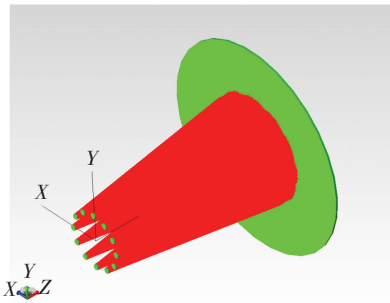


图 4 LED 阵列发光模型

Fig. 4 LED array luminescence model

在目标距离 $z = 1 \text{ m}$ 的情况下,利用光学仿真软件 Tracepro 修改单颗 LED 的发光半角为 7.5° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° ,得出对应情况下的光斑半径 R 、发散角 α 及中心照度 E_0 如表 2 所示。

表 2 圆形阵列中心照度 E_0 、光斑半径 R 及发散角 α

Tab.2 Central illuminance E_0 , spot radius R and divergence angle α of circular array

$\theta_{\frac{1}{2}} / (^\circ)$	E_0 / lx	R / m	$\alpha / (^\circ)$
7.5	277.83	0.557 5	44.34°
15	229.98	0.613 3	49.72°
30	119.05	0.836 3	68.92°
45	62.15	1.170 8	91.18°
60	41.45	1.561 0	109.35°
75	33.33	1.588 9	110.40°

为了弥补数值计算方法的不足,采用函数方法进行拟合。根据表 2 中的数据,采用最小二乘法进行多项式拟合。得到最优的拟合变量,最后得出圆形阵列中心照度随着发光半角 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化如图 5 所示。函数表达式为:

$$E_0 = -0.0002484\theta_{\frac{1}{2}}^3 + 0.1032\theta_{\frac{1}{2}}^2 - 10.64\theta_{\frac{1}{2}} + 357.2, \quad (8)$$

圆形阵列的光斑半径 R 随 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化曲线如图 6 所示,函数表达式为:

$$R = -9.635 \times 10^{-6}\theta_{\frac{1}{2}}^3 + 0.001173\theta_{\frac{1}{2}}^2 - 0.02182\theta + 0.6871, \quad (9)$$

圆形阵列发散角 α 随 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化曲线如图 7 所示,函数表达式为:

$$\alpha = -0.0005096\theta_{\frac{1}{2}}^3 + 0.05608\theta_{\frac{1}{2}}^2 - 0.484\theta + 46.31, \quad (10)$$

为了能更清楚地看出中心照度、光斑半径、发散角 α 随 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化趋势,分别对其求变化率,如图 8 所示。

从图 5~8 可以看出,随着单颗 LED 的发光半

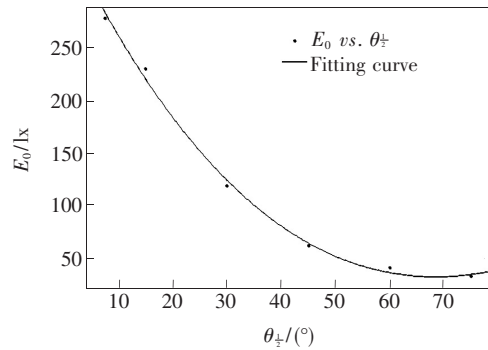


图 5 中心照度 E_0 随发光半角 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化曲线

Fig.5 Change curve of center illuminance E_0 with luminous half angle

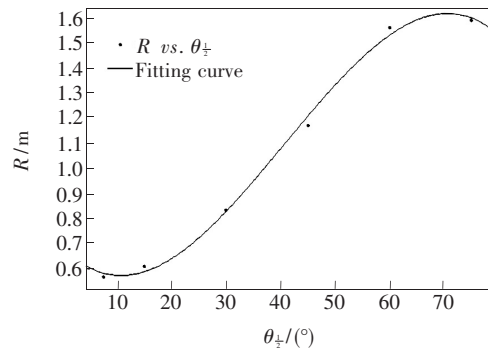


图 6 光斑半径 R 随 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化曲线

Fig.6 Variation curve of the radius R of the spot of light

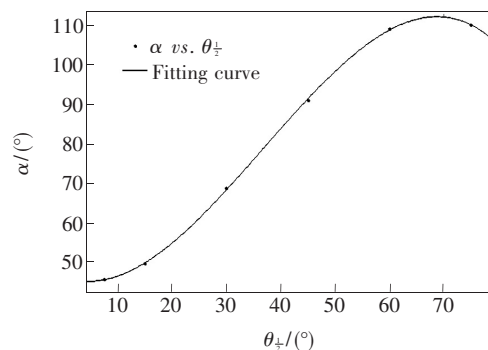


图 7 发散角 α 随 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的变化曲线

Fig.7 Curve of divergence angle α

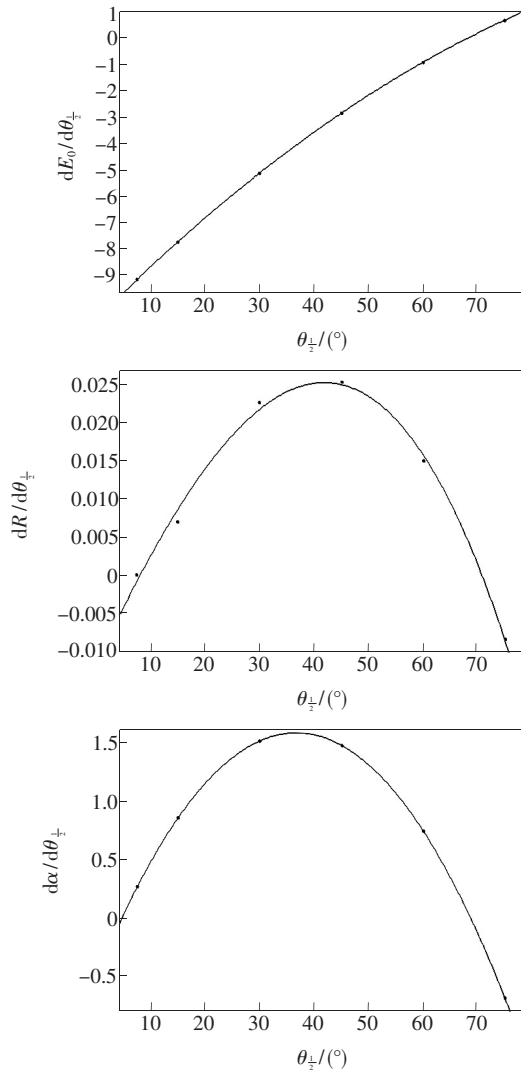


图 8 圆形阵列曲线变化率

Fig. 8 Change rate of circular array curve

角 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的增大, 圆形阵列中心的照度值逐渐降低, 且降低的速率近似线性增长。这是由于在实际照明和利用 Tracepro 模拟时, 接收面的面积不能定义成无限大, 应该选取适当的大小, 这样才能符合实际照明的需求, 发光半角的增大会导致圆形阵列聚光性能的降低, 且随着发光半角的增大 LED 阵列在发光过程中的反射、再吸收、大量转化为热量的情况也逐渐增加, 使得 LED 阵列中心照度值降低的速度增长。光斑半径和发散角的函数图像变化趋势很相似, 随着发光半角的增大, 光斑半径和发散角都逐渐增大, 变化率先增大后减小, 且都在发光半角为 40° 左右增幅最大。反观中心照度图像可以看出, 在 40° 左右降低的速率较快, 说明当发光半角为 40° 左右时, 圆形阵列的光斑半径和发散角很理想, 但是中心照度值偏低, 因此可以

通过控制 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 的值来实现控制圆形阵列的中心照度、光斑半径和发散角。同时这也为实际照明中对中心照度、光斑半径和发散角的取舍问题提供了很好的参考。

4 圆形阵列辐照均匀性的研究

实际照明中不仅仅对 LED 的中心照度、光斑半径和发散角有要求, 对辐照均匀性也有要求。以往对辐照均匀性的研究常利用五点法^[15], 但采用五点法测量照度的均匀度存在许多缺陷, 例如取样点太少、没有定义有效光斑半径等。而本文对有效光斑半径给出了明确的定义, 在有效光斑半径下去研究辐照均匀性更加合理可行, 定义辐照均匀度 u 为^[6]:

$$u = \frac{\bar{E}}{E_0}, \quad (11)$$

其中 \bar{E} 为有效光斑半径下的照度均值, 光斑半径在 $[-R, R]$ 范围内, 利用 MATLAB 软件对其求积分, 得到接收面面积为 10 m^2 时不同发光半角对应的辐照均匀性 u 如表 3 所示。

表 3 10 m^2 时不同发光半角对应的辐照均匀性

Tab. 3 Irradiance uniformity under different illuminant half angles under 10 m^2

$\theta_{\frac{1}{2}}/(\circ)$	u
7.5	0.393 4
15	0.397 8
30	0.427 2
45	0.437 5
60	0.352 6
75	0.345 5

从表 3 中可以看出, 随着单颗 LED 发光半角的增大, 辐照均匀性 u 先增大后减小, 在 45° 时取得最大值, 但是辐照均匀性还是不理想, 可能是由于接收面的面积太大导致的。为了进一步探究发光半角与接收面的关系, 依次修改接收面的大小为 $8, 6, 4, 2, 1 \text{ m}^2$, 发光半角与辐照均匀性的关系如表 4 所示。

为了能更清晰地看出不同接收面面积下发光半角与辐照均匀性的关系, 利用 MATLAB 画出变化的图像如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 最大的辐照均匀度接近 0.7, 最小的辐照均匀度也有 0.4 左右。当接收面

表 4 不同接收面面积下发光半角与辐照均匀性的关系
Tab. 4 Relationship between radiation half angle and irradiation uniformity under different receiving area

$\theta_{\frac{1}{2}}/(\circ)$	面积/ m^2				
	8	6	4	2	1
7.5	0.396 6	0.399 2	0.408 1	0.441 8	0.499 6
15	0.399 1	0.401 3	0.405 1	0.409 5	0.410 1
30	0.440 1	0.451 6	0.471 3	0.499 1	0.611 1
45	0.442 0	0.446 3	0.451 6	0.556 2	0.652 2
60	0.360 7	0.388 5	0.443 8	0.555 3	0.649 7
75	0.360 1	0.388 2	0.442 9	0.554 8	0.646 3

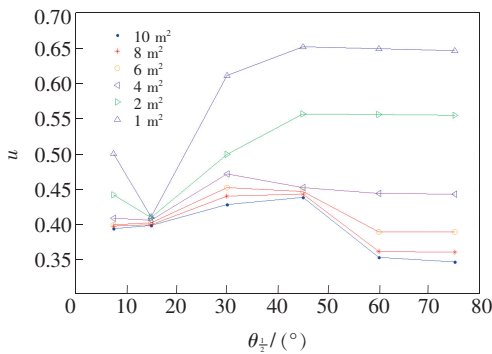


图 9 不同接收面面积下的发光半角与辐照均匀性的关系

Fig. 9 Relationship between radiation half angle and irradiation uniformity under different receiving area

的面积一定时,圆形阵列辐照均匀度随着单颗发光半角的增大而增大,而后保持稳定,接收面面积越小,辐照均匀度越高。在接收面面积较大时,发光半角较大导致光线的汇聚程度下降,进而导致中心处辐照度值大的区域减小,辐照均匀度下降。另外,在发光半角为 45° 时,不同的接收面面积

表 6 优化后不同发光半角的不同接收面面积下发光半角与辐照均匀性的关系

Tab. 6 Relationship between luminous half angle and irradiation uniformity under different receiver half area with different luminous half angles after optimization

$\theta_{\frac{1}{2}}/(\circ)$	面积/ m^2					
	10	8	6	4	2	1
7.5	0.453 0	0.486 7	0.534 9	0.567 1	0.578 0	0.577 3
15	0.432 0	0.446 0	0.468 1	0.506 4	0.563 4	0.610 8
30	0.475 9	0.484 8	0.493 6	0.501 8	0.603 0	0.632 8
45	0.440 7	0.448 8	0.491 1	0.558 6	0.643 5	0.692 8
60	0.520 4	0.573 4	0.640 7	0.718 8	0.774 9	0.779 4
75°	0.597 4	0.631 9	0.691 8	0.750 2	0.777 0	0.778 2

下其辐照均匀性都是最好的。但在实际的照明中不同的阵列半径对辐照均匀性也有很大的影响,对于目标平面上的光照均匀问题,可以根据斯派罗法则的最大限度平坦条件进行求解^[15],对公式(5)求二阶偏导数,在 $x=0, y=0$ 处使 $\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0$, 将 $N=12$ 带入得:

$$r_0 = \sqrt{\frac{2}{m+2}} \cdot z, \quad (12)$$

其中, r_0 为最大平坦条件,即是圆形阵列的半径;发光面距离接收面的距离 $z=1\text{ m}$;由于发光半角的不同导致 m 不同。分别求出不同发光半角下的最大平坦条件如表 5 所示。

修改不同发光半角下的最大平坦条件,得到接收面的大小为 $10, 8, 6, 4, 2, 1\text{ m}^2$ 时,发光半角与辐照均匀性的关系如表 6 和图 10 所示。

从表 6 和图 10 中可以看出,经过优化后整体的辐照均匀性都在优化前的图形之上,最大的辐照均匀度接近 0.8,最小的辐照均匀度也有 0.5 左右,优化后的辐照均匀性有了较大的提升。且当接收面面积一定时,随着发光半角的增大,辐照

表 5 不同发光半角下的最大平坦条件

Tab. 5 Maximum flat conditions under different luminescent half angles

$\theta_{\frac{1}{2}}/(\circ)$	r_0/m
7.5	0.155 5
15	0.301 5
30	0.541 5
45	0.707 1
60	0.816 5
75	0.890 9

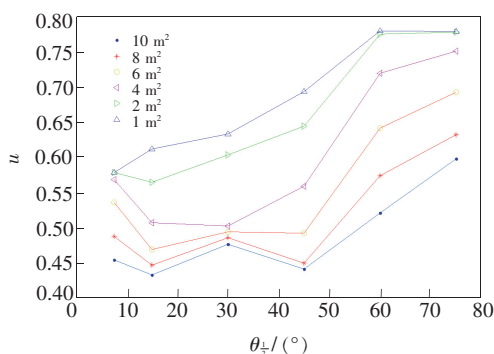


图10 优化后不同接收面面积下的发光半角与辐照均匀性的关系

Fig. 10 Relationship between radiation half angle and irradiation uniformity under different receiver surface area after optimization

均匀性增大。在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时上升的速度最快,幅度最大;在发光半角为 60° 时,不同接收面面积下其辐照均匀性都是最好的。在以后的圆形光学阵列设计中,若要使接收面的辐照均匀度较高,可以采用 60° 发光半角的阵列方式,即单颗 LED 发光满足标准的朗伯光源分布,这样阵列的辐照均匀度更高。

5 结 论

本文利用 Tracepro 软件对不同发光半角的圆形 LED 阵列进行模拟仿真,对得出来的数据结果使

用 MATLAB 软件进行函数数值的拟合分析。探究了单颗 LED 发光半角与圆形 LED 阵列发光特性的关系和对辐照均匀性的影响,得出的主要结论如下:

(1) 随着单颗 LED 发光半角的增大,圆形阵列的中心照度值逐渐降低,且降低的速率近似线性增长;光斑半径和发散角都逐渐增大,变化率先增大后减小。在发光半角为 40° 左右时,光斑半径和发散角增长速率较快,但中心照度值偏低。

(2) 在探究圆形阵列辐照均匀性的时候摒弃了传统的五点法,在有效光斑半径下去研究辐照均匀性更加合理可行。辐照均匀度随着发光半角的增大而增大,而后保持稳定;接收面的面积越小辐照均匀度越高。经过优化后,整体的辐照均匀度有了很大的提升,当接收面面积一定时,随着单颗 LED 发光半角的增大,辐照均匀度增大,发光半角为 60° 的圆形阵列辐照均匀性最好。

实际工程实践中需要根据实际需要,充分考虑到中心照度值、光斑半径、发散角、辐照均匀性等因素来选择合适的阵列形式。利用 Tracepro 模拟仿真时没有附加任何的光学系统,因而不存在能量损失,这样再利用 MATLAB 去拟合不同发光半角对辐照特性的关系会更加可靠准确,为实现圆形 LED 阵列照明设计提供了理论依据。

参 考 文 献:

- [1] WANG K, LIU S, CHEN F, et al.. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, 11(10): 105501-1-10.
- [2] 安涛, 李朋, 杜牧涵, 等. 超薄发光层结构的荧光型白光有机发光器件 [J]. *发光学报*, 2015, 36(6): 645-650.
AN T, LI P, DU M H, et al.. Performance of fluorescent white organic light-emitting device by introducing ultrathin emitting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(6): 645-650. (in Chinese)
- [3] 吴淑梅, 霍彦明, 谭俊廷, 等. 基于 MATLAB 的 LED 阵列仿真 [J]. *液晶与显示*, 2009, 24(2): 299-302.
WU S M, HUO Y M, TAN J T, et al.. LED arrays simulation by using MATLAB [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2009, 24(2): 299-302. (in Chinese)
- [4] 罗晓霞, 刘华, 卢振武, 等. 实现 LED 准直照明的优化设计 [J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1351-1355.
LUO X X, LIU H, LU Z W, et al.. Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2011, 40(9): 1351-1355. (in Chinese)
- [5] 刘沁, 刘启能. 圆形 LED 阵列的光斑发散特性研究 [J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 858-862.
LIU Q, LIU Q N. Divergence characteristics of light spot of a circular LED array [J]. *Laser Technol.*, 2015, 39(6): 858-862. (in Chinese)
- [6] 王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED 阵列模组化中的照度均匀性问题 [J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0822004-1-7.
WANG J W, SU Z P, YUAN Z J, et al.. Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(8): 0822004-1-7. (in Chinese)
- [7] 赵芝璞, 季凌燕, 沈艳霞, 等. 基于 PSO 粒子群算法的 LED 照明系统光照均匀性研究 [J]. *发光学报*, 2013, 34(12): 1677-1682.

- ZHAO Z P,JI L Y,SHEN Y X,*et al.*. Research of illumination uniformity for LED arrays based on PSO algorithm [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013,34(12):1677-1682. (in Chinese)
- [8] 阙笑语,吴国华. 用于机器视觉测量曲面照明的 LED 阵列优化算法设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018,55(7):072201-1-6.
- QUE X Y,WU G H. Designing LED array for uniform illumination distribution on curved surface object in machine vision measurement by optimization algorithm [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2018,55(7):072201-1-6. (in Chinese)
- [9] 王洪,张奇辉,王海宏,等. 近场照度均匀的 LED 阵列设计 [J]. *光学与光电技术*, 2009,7(5):78-83.
- WANG H,ZHANG Q H,WANG H H,*et al.*. Design of LED arrays for uniform near-field illumination [J]. *Opt. Optoelectron. Technol.*, 2009,7(5):78-83. (in Chinese)
- [10] 侯启真,薛荣荣,王洁宁. LED 阵列发光特性仿真和对比分析 [J]. *液晶与显示*, 2017,32(12):961-967.
- HOU Q Z,XUE R R,WANG J N. Simulation and comparative analysis of LED arrays in light-emitting characteristics [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017,32(12):961-967. (in Chinese)
- [11] 许耀云. 基于均匀照明的 LED 光学系统设计 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2012.
- XU Y Y. *Uniform Illumination of The LED Optical System Design* [D]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2012. (in Chinese)
- [12] 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.
- YU G Y,JIN J,NI X W,*et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2009,29(8):2297-2301. (in Chinese)
- [13] 肖韶荣,杨丽,吴群勇,等. 紫外 LED 圆环阵列均匀照明的实现方法 [J]. *应用光学*, 2013,34(5):742-747.
- XIAO S R,YANG L,WU Q Y,*et al.*. Realization of uniform illumination of UV LED circle array [J]. *J. Appl. Opt.*, 2013,34(5):742-747. (in Chinese)
- [14] 甘振华,杜民,高跃明,等. 单芯大功率 LED 匀光照明阵列的设计 [J]. *光学仪器*, 2016,38(6):505-511.
- GAN Z H,DU M,GAO Y M,*et al.*. A uniform illumination array design based on single-core high-power LED [J]. *Opt. Instrum.*, 2016,38(6):505-511. (in Chinese)
- [15] 张宁. LED 面光源均匀化设计 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2012:26-28.
- ZHANG N. *Design of The Light-emitting Diode Surface Light Source for Uniform Illumination* [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology, 2012:26-28. (in Chinese)



张玉宝(1962 -),男,内蒙古包头人,硕士,教授,1993 年于东北大学获得硕士学位,主要从事 LED 光电传感器技术的研究。
E-mail: btzyb@126.com



董礼(1993 -),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,2016 年于沈阳建筑大学获得学士学位,主要从事光谱学与光谱分析的研究。
E-mail: yuzubinglei@163.com