

文章编号: 1000-7032(2018)05-0699-07

大型 LED 矩形阵列光斑照度的均匀性研究

刘启能^{1,2*}, 刘 沁³

(1. 重庆工商大学 重庆市检测控制集成系统工程实验室, 重庆 400067;

2. 重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067; 3. 重庆工商大学 设计艺术学院, 重庆 400067)

摘要: 应用 LED 芯片的照度公式以及大型 LED 矩形阵列照度分布的对称性, 建立了研究大型 LED 矩形阵列照度均匀度的物理模型, 推导出计算大型 LED 矩形阵列照度均匀度的公式。利用该公式研究了大型 LED 矩形阵列照度均匀度随目标距离、长宽比以及 m 值的变化规律。得出: 照度均匀度随目标距离的增加而非线性地减小; 照度均匀度随长宽比的增加而非线性地增大; 照度均匀度随 m 值的增加而近似成线性地增大。这些规律为提高大型 LED 矩形阵列的照度均匀性提供了理论依据, 也为大型 LED 矩形阵列的照度均匀性设计提供了研究方向和计算方法。弥补了之前研究 LED 阵列照度均匀性方法上的不足。

关键词: 发光二极管; 矩形阵列; 光斑半径; 均匀度

中图分类号: O435; O432.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183905.0699

Illumination Uniformity of Large LED Rectangular Array

LIU Qi-neng^{1,2*}, LIU Qin³

(1. Laboratory of Test Control Integrated System Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

3. Institute of Design and Art, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

* Corresponding Author, E-mail: liuqineng57@163.com

Abstract: Using the illumination formula of single LED wick and the symmetry of large LED rectangular array illumination distribution, a physical model for the illumination uniformity of large LED rectangular arrays was established. The illumination uniformity of large LED rectangular array was derived. This formula is used to study the illumination uniformity of large LED rectangular arrays with the target distance and the ratio of length to width and the m values. The illumination uniformity doesn't linearly decrease with the increasing of the target distance, doesn't linearly increase with the increasing of the ratio of length to width, and linearly increases with the increasing of m value. These rules provide theoretical basis for improving the uniformity of large LED rectangular arrays, the research direction and calculation method are provided for the illumination uniformity design of large LED rectangular array. It makes up for the lack of the uniformity of LED array illumination.

Key words: LED; rectangular array; spot radius; uniformity

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 重庆市教委科技项目(KJ1500629); 重庆工商大学科技项目(1552006)资助

Supported by Science and Technology Project of Chongqing Education Committee(KJ1500629); Science and Technology Project of Technology and Business University(1552006)

1 引 言

作为一种新型光源,发光二极管(LED)由于其发光效率高(节能)、使用寿命长已被广泛地使用于各种照明环境。怎样让这种新型的光源在照明领域内得到更充分的使用,发挥出更大的应用价值。这就促使人们越来越重视在理论上对LED照明特性进行研究^[1-5]。近年来对LED照明特性的研究在很多方面都取得了成果,文献[6]对利用自由曲面透镜来实现单个LED光源的大视场角准直照明问题开展了研究,文献[7-8]对自由曲面重新配光来实现单个LED光源的均匀照明问题开展了研究。随着对LED光源照明特性的深入研究,人们把注意力放在了对LED阵列的照明特性的研究上,文献[9-11]对方形和圆形两种典型LED阵列的照明特性展开了研究,得出了其照明的变化规律和光斑的发散规律。文献[12-13]分别对LED圆形阵列和LED方形阵列照度的均匀性问题开展了研究,得出了LED圆形阵列和LED方形阵列照度的均匀度与阵列结构参数的关系。

目前对LED阵列照度均匀度的研究中还存在3个问题有待进一步深入:一是对光斑的范围没有做准确的定义,使得研究照度均匀度没有准确的范围;二是研究的对象仅是LED小型阵列(由一百个以内的LED灯芯构成的阵列),而对大型LED矩形阵列(由一万个以上的LED灯芯构成的阵列)的照度均匀度问题没有做研究;三是仅对方形和圆形两种典型阵列的照度均匀度进行了研究,而对更一般的矩形阵列的照度均匀度问题未开展研究。而对现代的照明环境使用LED大型阵列的情况越来越多、越来越广,因此在理论上弄清大型LED矩形阵列这种非常具有代表性阵列的照度均匀度的变化规律有着重要的理论价值和应用价值。本文将对大型LED矩形阵列的照度均匀度展开研究,根据单个LED灯芯的照度公式以及大型LED矩形阵列在目标平面上照度分布的对称性,建立了研究大型LED矩形阵列光斑的照度均匀度的物理模型,推导出计算大型LED矩形阵列光斑的照度均匀度公式。利用该公式研究了大型LED矩形阵列照度均匀度随目标距离、矩形长宽比以及 m 值的变化规律。这些规律的获得为提高大型LED矩形阵列的照度均

匀性提供了理论依据,也为大型LED矩形阵列的照度均匀性设计提供了研究方向和方法。

2 理论建立

LED大型圆形阵列的照度公式建立在单个LED芯片的照度公式的基础上。对于LED单个芯片,其视角 θ 与光强 I 由下式确定^[14]:

$$I = I_0 \cos^m \theta, \quad (1)$$

式中的 m 值由半角 $\theta_{1/2}$ 决定($\theta_{1/2}$ 为光强降为中心光强一半对应的视角), I_0 为视角为 0° 方向的光强。LED芯片的 m 值根据制造工艺确定,由生产厂家提供。

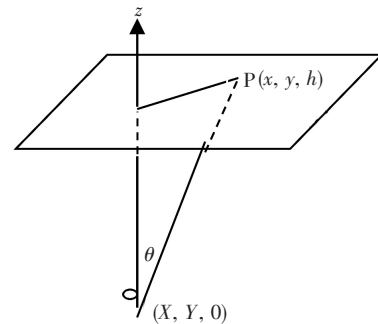


图1 单个LED芯片的照度

Fig. 1 Illuminance of a single chip

目标平面上的照明点P的坐标在 (x, y, h) 处,LED芯片的坐标为 $(X, Y, 0)$,见图1。在P点处LED芯片产生的照度 E 与光强 I 由下式确定^[14]:

$$E(x, y, h) = \frac{I \cos \theta}{l^2}, \quad (2)$$

其中 l 为芯片到P点的距离。结合式(1)和式(2),可得在P点处单个LED芯片产生的照度为:

$$E(x, y, h) = \frac{I_0 h^{m+1}}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}}, \quad (3)$$

如果在平面 $z=0$ 上有 N 个LED芯片,由于 N 个LED芯片发出的光彼此为非相干光,因此它们发出光的叠加为非相干叠加,即在P点处产生的照度为:

$$E(x, y, h) = \sum_{n=1}^N \frac{I_0 h^{m+1}}{[(x-X_n)^2 + (y-Y_n)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}}, \quad (4)$$

其中 X_n, Y_n 为第 n 个LED芯片的坐标。

下面研究的大型LED矩形阵列采用的设计为:矩形阵列的长边边长为 A ,平行于 x 轴;宽边

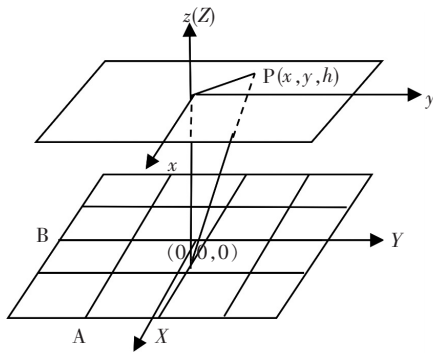


图 2 大型 LED 矩形阵列的照度

Fig. 2 Illumination of large LED rectangular array

边长为 B , 平行于 y 轴。将长边和宽边都用奇数 M 个点等分, 构成矩形阵列网格。每个小矩形网格的长为 $a = A / (M + 1)$ 、宽为 $b = B / (M + 1)$ 。在该矩形阵列网格的每个节点上放置一个 LED 芯片, 则该大型 LED 矩形阵列的 LED 芯片总数 $N = (M + 2) \times (M + 2)$ 。该大型 LED 矩形阵列放置于 $z = 0$ 平面内, 阵列中心处的芯片的坐标在 $(0, 0, 0)$ 处, 目标平面为 $z = h$, 如图 2。由(4)式可得在目标平面上 P 点该大型 LED 矩形阵列产生的照度为:

$$E(x, y, h) = \frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[(x - ia)^2 + (y - jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}}, \quad (5)$$

利用式(5)可以研究该大型 LED 矩形阵列在目标平面上光斑的照度规律。照度在目标平面上 x 轴和 y 轴上的公式分别为:

$$E_x = \frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[(x - ia)^2 + (jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}},$$

$$E_y = \frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[(ia)^2 + (y - jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}}, \quad (6)$$

由于该大型 LED 矩形阵列芯片的分布相对于 x 轴、 y 轴以及 z 轴是对称的, 所以阵列在目标平面产生的照度分布也是以 z 轴为对称轴。由对称性可知光斑的照度峰值出现在目标平面上的 $(0, 0, h)$ 处, 由式(5)可得光斑的照度峰值 E_0 满足:

$$E_0(h) = \frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[h^2]^{\frac{m+3}{2}}}.$$

$$\frac{I_0 h^{m+1}}{[(ia)^2 + (jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}}, \quad (7)$$

对于聚光性较好的 LED 芯片, 照度 E 大于光斑中心照度 $0.2E_0$ 的范围内汇集了 90% 以上的光通量。由此可以确定照度光斑的范围满足的关系为^[9]:

$$E \geq 0.2E_0, \quad (8)$$

由于该大型 LED 矩形阵列的芯片在 x 轴和 y 轴方向分布不同, 因此其光斑边缘到光斑中心的距离在 x 轴和 y 轴上是不同的。设在 x 轴上光斑中心到光斑边缘的距离为 R_x , 在 y 轴上光斑中心到光斑边缘的距离为 R_y , 由式(6)和式(8)可得 R_x 和 R_y 满足方程:

$$\frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[(R_x - ia)^2 + (jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}} = 0.2E_0,$$

$$\frac{\sum_{i=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} \sum_{j=-(M+1)/2}^{(M+1)/2} I_0 h^{m+1}}{[(ia)^2 + (R_y - jb)^2 + h^2]^{\frac{m+3}{2}}} = 0.2E_0, \quad (9)$$

取 $M = 99$, 则阵列的 LED 芯片总数 $N = 101 \times 101 = 10201$ 个, $m = 20$, $A = 8$ m, $B = 5$ m, 单个芯片的 $I_0 = 2$ cd。由式(5)、(6)、(9)计算出在目标距离 $h = 10$ m 处光斑的形状以及在 x 轴和 y 轴上照度的分布曲线, 如图 3 所示。由图 3(a)可知, 该阵列的光斑为椭圆。由图 3(b)和图 3(c)可知, 照度在 x 轴和 y 轴上的分布具有对称性。

下面在上述光斑和照度分布的对称性基础上建立大型 LED 矩形阵列照度均匀度的评价方法。在文献[12-13]中建立的研究 LED 阵列照度均匀度的计算方法中, 由于没有对光斑的区域作鉴定, 再加上大型 LED 矩形阵列的灯芯数巨大, 因此用文献[12-13]中的照度均匀度的计算方法来研究大型 LED 方形阵列照度均匀度会遇到困难。为了解决上述困难, 首先在光斑和照度分布的对称性基础上建立照度均匀度 u 的概念。由于该阵列的光斑的对称性以及照度在 x 轴和 y 轴上的分布具有对称性, 可以引入 x 轴和 y 轴上的照度均匀度 u_x 和 u_y 的概念来描述光斑内照度在 x 轴和 y 轴上的均匀程度, 即:

$$u_x = \frac{\bar{E}_x}{E_0}, \quad u_y = \frac{\bar{E}_y}{E_0}, \quad (10)$$

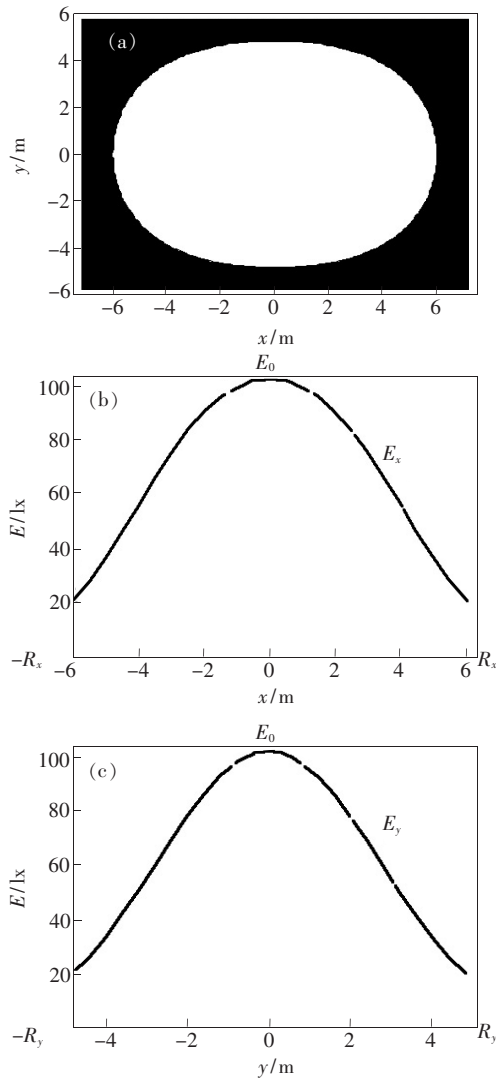


图 3 大型 LED 矩形阵列的光斑和照度分布曲线

Fig. 3 Light spot and the illumination of large LED rectangular array

其中 $\bar{E}_x = \int_{-R_x}^{R_x} E_x dx / 2R_x$, $\bar{E}_y = \int_{-R_y}^{R_y} E_y dy / 2R_y$, E_0 为照度峰值。式(10)进一步化解为:

$$u_x = \frac{\int_{-R_x}^{R_x} E_x dx}{2R_x E_0}, \quad u_y = \frac{\int_{-R_y}^{R_y} E_y dy}{2R_y E_0}, \quad (11)$$

式(11)中 u_x 和 u_y 的几何意义是:在图 3(b)和图 3(c)中的照度曲线在光斑内的面积与照度峰值在光斑内的面积之比。 u_x 和 u_y 越大表明照度曲线在光斑内的面积越接近照度峰值在光斑内的面积,其照度的均匀性就越好。因此可以分别用 u_x 和 u_y 的大小来衡量照度在 x 轴和 y 轴上的均匀程度。但是 u_x 和 u_y 还不能准确地描述整个光斑内照度的均匀程度,利用该阵列光斑照度的对称性,对 u_x 和 u_y 做光斑长度的加权平均,即:

$$u = \frac{2R_x}{2R_x + 2R_y} u_x + \frac{2R_y}{2R_x + 2R_y} u_y, \quad (12)$$

式(12)中的 u 就能够描述该阵列的照度均匀程度,利用式(12)即可以研究大型 LED 矩形阵列的照度均匀度的变化规律。

3 照度均匀度

下面应用式(6)~(12),利用数值计算法研究大型 LED 矩形阵列的照度均匀度随目标距离、矩形长宽比以及 m 值的变化规律。该大型 LED 矩形阵列仍取 $M = 99$, 则阵列的 LED 芯片总数 $N = 101 \times 101 = 10201$ 个,单个芯片的 $I_0 = 2$ cd。

3.1 照度均匀度与目标距离的关系

固定 $m = 20$ 、长 $A = 8$ m、宽 $B = 5$ m (长宽比 $A/B = 1.6$),取目标距离 z 为 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 m 10 组数据,计算出对应的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 的数据,见表 1。

利用表 1 中的数据绘出照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 随目标距离的响应曲线,如图 4 所示。在图 4 中实线、虚线、点划线分别为 u 、 u_x 、 u_y 随目标距离的响应曲线。由图 4 可知:目标距离对照度均匀度 u 、 u_x 、 u_y 都有明显的影响,照度均匀度 u 、 u_x 、 u_y 都随目标距离的增加而非线性地减小。当目标距离为 8 m 时,其照度均匀度 u 、 u_x 、 u_y 分别为 0.687,

表 1 不同目标距离下的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u

Tab. 1 u_x , u_y , u under different target distance

z/m	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
u_x	0.707	0.691	0.680	0.672	0.666	0.661	0.658	0.655	0.653	0.652
u_y	0.661	0.656	0.653	0.650	0.649	0.648	0.647	0.646	0.645	0.645
u	0.687	0.676	0.668	0.662	0.658	0.655	0.653	0.651	0.650	0.649

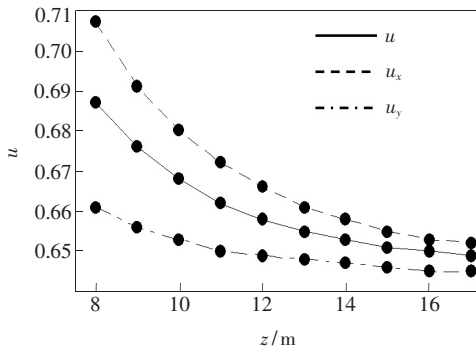


图 4 均匀度随目标距离的响应曲线

Fig.4 Response curves of the uniformity versus target distance

0.707, 0.661; 当目标距离增大为 17 m 时, 其照度均匀度 u 、 u_x 、 u_y 分别减小为 0.649, 0.652, 0.645。照度均匀度随目标距离变化的这一规律为提高大型 LED 矩形阵列照度均匀度的设计提供了方向, 要想获得较好的照度均匀度其目标距离不能太远。

3.2 照度均匀度与长宽比的关系

固定目标距离 $z = 10$ m、 $m = 20$ 、宽 $B = 5$ m。取长宽比 A/B 为 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0 等 10 组数据, 计算出对应的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 的数据, 见表 2。

表 2 不同长宽比 A/B 下的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u

Tab.2 u_x , u_y , u under different A/B

A/B	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
u_x	0.656	0.660	0.664	0.669	0.674	0.680	0.686	0.693	0.700	0.705
u_y	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653	0.653
u	0.655	0.656	0.658	0.661	0.664	0.668	0.672	0.676	0.680	0.684

利用表 2 中的数据绘出照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 随长宽比的响应曲线, 如图 5 所示。在图 5 中, 实线、虚线、点划线分别为 u 、 u_x 、 u_y 随长宽比的响应曲线。由图 5 可知: 长宽比对照度均匀度 u 、 u_x 有明显的影 响, 照度均匀度 u 、 u_x 都随长宽比的增加而非线性地增大。当长宽比为 1.1 时, 其照度均匀度 u 、 u_x 分别为 0.655, 0.656; 当长宽比增大为

2.0 时, 其照度均匀度 u 、 u_x 分别增大为 0.684, 0.705。在图 5 中, u_y 不随长宽比的增加而变化, 其原因是计算中其宽边 B 保持不变。照度均匀度随长宽比变化的这一规律为提高大型 LED 矩形阵列照度均匀度的设计提供了方向, 要想获得较好的照度均匀度可以适当增加矩形阵列的长宽比。

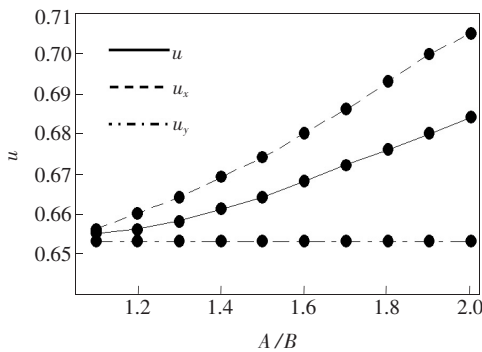


图 5 均匀度随长宽比的响应曲线

Fig.5 Response curves of the uniformity versus ratio of length to width

3.3 照度均匀度与 m 值的关系

固定目标距离 $z = 10$ m、长 $A = 8$ m、宽 $B = 5$ m。取 $m = 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24$, 计算出对应的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 的数据, 见表 3。

利用表 3 中的数据绘出照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 随 m 值的响应曲线, 如图 6 所示。在图 6 中, 实线、虚线、点划线分别为 u_x 、 u_y 、 u 随长宽比的响应曲线。由图 6 可知: m 值对照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 有明显的影 响, 照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 都随 m 值的增加近似成线性地增大。当 m 值为 15 时, 其照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 分别为 0.660, 0.669, 0.649; 当 m 值增大

表 3 不同 m 值下的照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u

Tab.3 u_x , u_y , u under different m value

m	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
u_x	0.669 0	0.671 1	0.673 3	0.675 7	0.677 8	0.680 1	0.682 4	0.684 6	0.686 9	0.689 1
u_y	0.649 0	0.649 8	0.650 4	0.651 2	0.652 0	0.6528	0.653 5	0.654 3	0.555 0	0.655 8
u	0.660 0	0.661 3	0.663 0	0.664 6	0.666 3	0.667 9	0.669 5	0.671 2	0.672 8	0.674 5

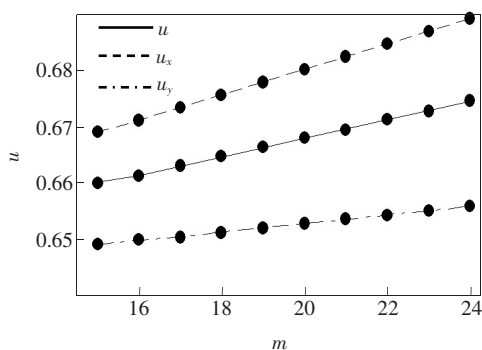


图 6 均匀度随 m 值的响应曲线

Fig. 6 Response curves of the uniformity versus m value

为 24 时,其照度均匀度 u_x 、 u_y 、 u 分别增大为 0.674 5, 0.689 1, 0.655 8。照度均匀度随 m 值变化的这一规律为提高大型 LED 矩形阵列照度均匀度的设计提供了方向,要想获得较好的照度均匀度应该选择 m 值较大的芯片。

参 考 文 献:

- [1] DING Y, LIU X, ZHENG Z R. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(17): 12958-12966.
- [2] 苏宙平, 阙立志, 朱焯炜. 用于 LED 光源准直的紧凑型光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022203.
SU Z P, QUE L Z, ZHU Z W. Optical system design of the compact collimator for LED source [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2012, 49(2): 022203. (in Chinese)
- [3] SUN C C, CHEN C Y, HE H Y. Precise optical modeling for silicate-based white LEDs [J]. *Opt. Express*, 2008, 16: 20060.
- [4] SUN C C, CHIEN W T, MORENO I. Analysis of the far-field region of LEDs [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(12): 13918-13922.
- [5] 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): 105501-105505.
- [6] 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)
- [7] 丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器 [J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 540-544.
DING Y, GU P F. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2007, 27(3): 540-544. (in Chinese)
- [8] 丁毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计 [J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1486-1490.
DING Y, ZHENG Z R, GU P F. Freeform lens design for LED illumination [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2009, 38(6): 1486-1490. (in Chinese)
- [9] 刘沁, 刘启能. 方形 LED 阵列光斑发散特性的幂函数拟合 [J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 56-60.
LIN Q, LIU Q N. Power function fitting methods of light spot divergence characteristics of LED square array [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(1): 56-60. (in Chinese)
- [10] 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): 701-704.
LIN Q, LIU Q N. Divergence characteristics of light spot of LED roundness array [J]. *Laser Technol.*, 2015, 39(6):

4 结 论

应用 LED 灯芯的照度公式以及大型 LED 矩形阵列在目标平面上照度分布的对称性,建立了研究大型 LED 矩形阵列光斑的照度均匀度的物理模型,推导出计算大型 LED 矩形阵列光斑照度均匀度的公式。利用该公式研究了大型 LED 矩形阵列光斑的照度均匀度随目标距离、长宽比以及 m 值的变化规律。得出照度均匀度随目标距离的增加而非线性地减小;照度均匀度随长宽比的增加而非线性地增大;照度均匀度随 m 值的增加而近似成线性地增大。这些规律为提高大型 LED 矩形阵列的照度均匀性提供了理论依据,也为大型 LED 矩形阵列的照度均匀性设计提供了研究方向和计算方法,弥补了之前研究大型 LED 矩形阵列照度均匀性方法上的不足。

701-704. (in Chinese)

- [11] 刘启能, 代洪霞. 幂函数拟合研究 LED 圆形阵列光斑的发散特性 [J]. 人工晶体学报, 2015, 44(5):685-689.
LIU Q N, DAI H X. Power function fitting methods of light spot divergence characteristics of LED circular array [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2015, 44(5):685-689. (in Chinese)
- [12] 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(6):919-924.
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(6):919-924. (in Chinese)
- [13] 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):1677-1681.
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):1677-1681. (in Chinese)
- [14] 姚家祎. 照明设计手册 [M]. 北京:中国电力出版社, 2006:187-188.
YAO J W. *Lighting Design Manual* [M]. Beijing: China Power Press, 2006:187-188. (in Chinese)



刘启能(1957-),男,四川泸州人,
教授,主要从事应用光学的研究。
E-mail: liuqineng57@163.com