

文章编号:1007-2780(2017)12-0961-07

LED 阵列发光特性仿真和对比分析

侯启真¹, 薛荣荣^{1*}, 王洁宁²

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 空中交通管理研究基地, 天津 300300)

摘要: LED 正逐步替代传统卤素光源应用于机场助航灯, 跑道警戒灯作为防止飞机入侵跑道的重要助航灯, 针对其发光特性要求, 提出对环形和方形 LED 阵列中心照度和发光角度研究。首先给出单 LED 光源在目标平面中心照度和发光角度的计算方法。其次在满足均匀排布的前提下, 构造上述两种阵列, 利用 Matlab 仿真在不同目标距离下对应的中心照度、发光角度及光斑半径的变化规律, 并采用最小二乘法进行曲线拟合。最后通过光学软件 TracePro 进行追迹模拟仿真。结果表明: 随目标距离的增大, 两种阵列中心照度逐渐减小, 光斑半径和发光角度逐渐增大, 当目标距离小于 8 m 时, 两种阵列发光特性存在差异, 环形阵列的中心照度较大, 方形阵列发光角度较大, 随着目标距离的增大, 两种阵列的发光特性逐渐趋于一致。以 4C 级机场为例, 分析得出上述两种阵列对 A 型警戒灯均适用, B 型警戒灯适于采用方形阵列。

关键词: 光学设计; LED 阵列; 中心照度; 光斑半径; 发光角度

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20173212.0961

Simulation and comparative analysis of LED arrays in light-emitting characteristics

HOU Qi-zhen¹, XUE Rong-rong^{1*}, WANG Jie-ning²

(1. College of Electronic Information and Automation,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Air Traffic Management Research Base, Civil Aviation University of China,
Tianjin 300300, China)

Abstract: Traditional halogen light sources are being gradually replaced by LED for airfield navigation lights. The runway guard lights are important navigation lights to prevent the aircraft from invading the runway. The study of the ring and square LED array center illumination and luminous angle is proposed aiming at its requirements of the luminous characteristics. Firstly, the calculation method of center illumination and luminous angle of single LED light source at target plane is given. Secondly, the above two arrays are constructed in the premise of satisfying the uniform arrangement. The center

收稿日期: 2017-08-06; 修订日期: 2017-09-21.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2015YFB0502401)

National Key Research and Development Plan (No. 2015YFB0502401)

* 通信联系人, E-mail: rrxuecauc@163.com

illumination, the luminous angle and the spot radius of two arrays at different target distances are researched by Matlab, and the least square method is used to simulate the power function curve. Finally, the tracing simulation is performed through the software TracePro. The results show that with the increase of the target distance, the center illumination of the two arrays gradually decreases, the spot radius and the luminous angle of both gradually increase. When the target distance is less than 8 m, the luminous characteristics of the two arrays are different. The center illumination of ring array is slightly larger, and the luminous angle of square array is slightly larger. The luminous characteristics of the two arrays are gradually tending to consistency with the increase of the target distance. Taking the 4C class airport as an example, it is calculated that the above two arrays are applicable to A-type guard lights and square array is suitable for B-type guard lights.

Key words: optical design; LED array; center illumination; spot radius; luminous angle

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、抗震性好及高显色性等优点^[1-3],目前已广泛应用于特种照明领域,如机场目视助航灯、舰载直升机停机坪助降灯等。机场跑道警戒灯是防止飞机入侵跑道设置在跑道等待位置的关键灯具,《民用机场飞行区技术标准》规定可使用 A 和 B 两类构型, A 型警戒灯设置在滑行道边缘两侧,出射光构型为圆形; B 型警戒灯横跨滑行道全宽设置,出射光构型为方形。

由于警戒灯亮度较高,出射角较大,单个 LED 光源难以实现其远距离、大面积发光需求,故需将多个 LED 单光源进行组合排列成一定形状的 LED 阵列来满足其发光需求^[4-6]。近年来对 LED 阵列发光均匀性研究较多,如 Ivan Moreno 等研究了 LED 球面阵列的均匀性^[7];王加文、赵芝璞分别研究了方形及圆形 LED 阵列照度均匀性^[8-9];赖伟等对 LED 阵列应满足的远场条件进行了验证^[10]。但目前针对 LED 阵列中心照度、发光角度的研究尚未见相关的介绍。

本文针对机场跑道警戒灯对典型环形、方形 LED 阵列发光特性进行研究,在已知 LED 个数及单个 LED 中心光强、半光强角的前提下,对不同距离下两种 LED 阵列的中心照度、光斑半径、发光角度进行仿真研究,采用最小二乘法进行幂函数拟合,计算得出光学参数随目标距离变化的规律,得出两种 LED 阵列的照度分布特点及近场适用环境,最后给出 A、B 构型跑道警戒灯适于采

用的 LED 阵列构型。

2 LED 光学特性与模型

单 LED 光强分布如式(1)所示,是非理想朗伯体光源^[11-13]:

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

其中: θ 为发光角度; I_0 为 LED 沿光轴($\theta = 0^\circ$)的光强, m 值取决于 LED 半光强角 $\theta_{1/2}$,其关系为^[14]:

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

理论上 LED 光源可以近似为点光源,其照度为:

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

其中: r 为 LED 光源与目标平面观测点之间的距离。

将式(3)用直角坐标系表示,则 xy 平面内的 LED 光源到目标平面上任一点 $P(x, y, z)$ 的辐射照度可表示为^[15]:

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I_0}{[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2]^{(m+2)/2}}, \quad (4)$$

其中: z 为 LED 与目标面的距离, (X, Y) 为 LED 在 xy 平面上的坐标。

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,所形成的夹角为发光角度,故本文选取 $0.1E_0$ 作为被照面光斑边界,即:

$$E \geqslant 0.1E_0, \quad (5)$$

通过式(5)可得光斑半径 R , 则 LED 阵列的发光角度 α 可表示为:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{R - r_N}{h}, \quad (6)$$

其中: r_N 为环形阵列最大圆周半径、方形阵列边长的 $1/2$ 。

3 环形、方形 LED 阵列发光特性与目标距离的关系

根据《民用机场飞行区技术标准》,跑道警戒灯主光束水平发光角度应不小于 $\pm 10^\circ$, 且不能影响相邻滑行道的飞机, 故本文选用半光强角为 7.5° 的 LED 光源, 即 $m=81$, 法向光强 $I_0=12.5$ cd, 所构造环形阵列直径与方形阵列边长为 0.4 m, 阵列 LED 光源个数为 121 个。

3.1 LED 环形阵列

LED 环形阵列结构如图 1 所示, 环形阵列对称分布在 xy 平面内, 环心设在坐标原点处, 通过线性叠加可得目标平面任意一点照度分布如式(7)所示:

$$E(x, y, z) = z^m I_0 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \left[x - r_i \cos\left(\frac{2\pi j}{N_i}\right) \right]^2 + \left[y - r_i \sin\left(\frac{2\pi j}{N_i}\right) \right]^2 + z^2 \right\}^{-\frac{m+2}{2}}, \quad (7)$$

其中: M 为环形阵列环数, r_i 为第 i 个圆环半径, N_i 为第 i 个圆环上 LED 光源个数。

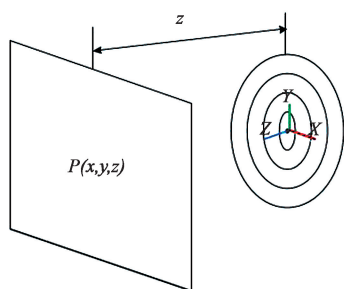


图 1 环形阵列布局示意图

Fig.1 Schematic diagram of circular array

为达到均匀照明效果, 便于与方形阵列对比, 在原点处设置一个 LED 光源, 将其余 120 个 LED 光源以 4 个环, 每环分别为 8、16、32、64 个数沿径向等距排列, 通过 Matlab 仿真出目标距离 $1 \sim 13$ m 环形 LED 阵列对应的光斑半径 R 、发光角度 α 及中心照度 E_0 , 如表 1 所示。

表 1 环形阵列光斑半径 R 、发光角度 α 及中心照度 E_0

Tab.1 Spot radius R , the luminous angle α and the center illumination E_0 of circular array

h/m	E_0/lx	R/m	$\alpha/(\text{^\circ})$
1	561.97	0.353 2	17.41
2	291.14	0.544 8	19.55
3	153.61	0.757 7	21.05
4	92.83	0.976 4	21.96
5	61.71	1.196 5	22.54
6	43.66	1.435 4	23.26
7	32.13	1.677 7	23.84
8	24.20	1.913 6	24.18
9	18.41	2.164 7	24.63
10	14.95	2.403 0	24.85
11	12.38	2.629 9	24.91
12	10.42	2.878 4	25.16
13	8.89	3.104 2	25.18

根据表 1 中数据, 采用最小二乘法进行幂函数拟合, 得到幂函数拟合的最优拟合变量, 最后得出环形阵列中心照度随目标距离 h 的变化曲线如图 2 所示, 函数表达式为:

$$E_0 = -52.049 + 618.14h^{-0.98356}, \quad (8)$$

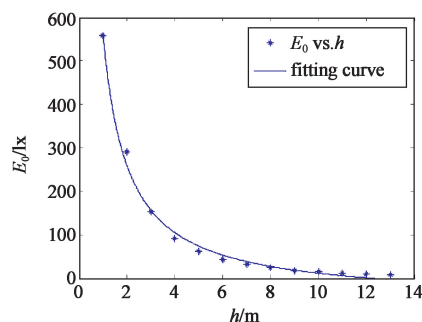


图 2 中心照度随 h 的变化曲线

Fig.2 Center illumination curve varying with h

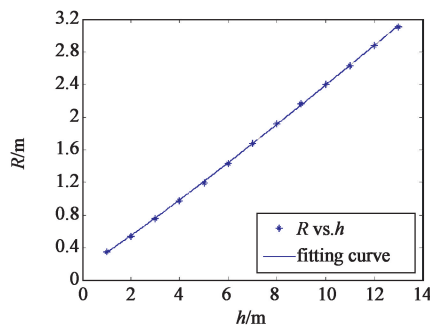
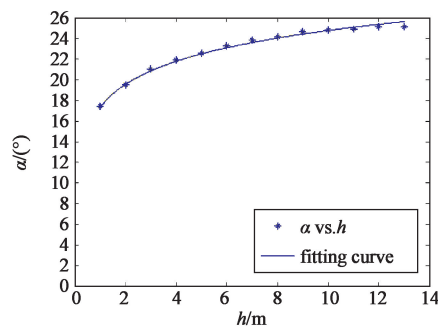
环形阵列光斑半径随目标距离 h 的变化曲线如图 3 所示, 函数表达式为:

$$R = 0.156 32 + 0.184 67h^{1.082 4}, \quad (9)$$

环形阵列发光角度随目标距离 h 的变化曲线如图 4 所示, 函数表达式为:

$$\alpha = -270.49 + 287.81h^{0.011 1}, \quad (10)$$

为了更直观地表示环形阵列中心照度、光斑半径

图 3 光斑半径随 h 的变化曲线Fig.3 Spot radius curve varying with h 图 4 发光角度随 h 的变化曲线Fig.4 Luminous angle curve varying with h

和发光角度随目标距离的变化规律,对 3 个光学参数分别求变化率,如图 5 所示,可得随目标距离的增大,环形阵列中心照度 E_0 先急剧减小后缓慢

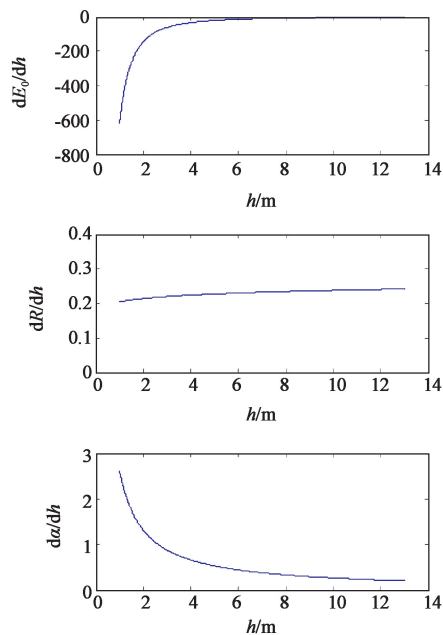


图 5 环形阵列曲线变化率

Fig.5 Rate of curve change of circular array

减小;光斑半径 R 近似呈线性增长;发光角度 α 先增长较快后缓慢增长,并逐渐趋于稳定。

利用 TracePro 软件仿真不同目标距离下的照射光斑图,如图 6 所示,可见不同目标距离下环形阵列照射光斑均为圆形,随着目标距离增大,中心照度逐渐变小,光斑半径逐渐变大。

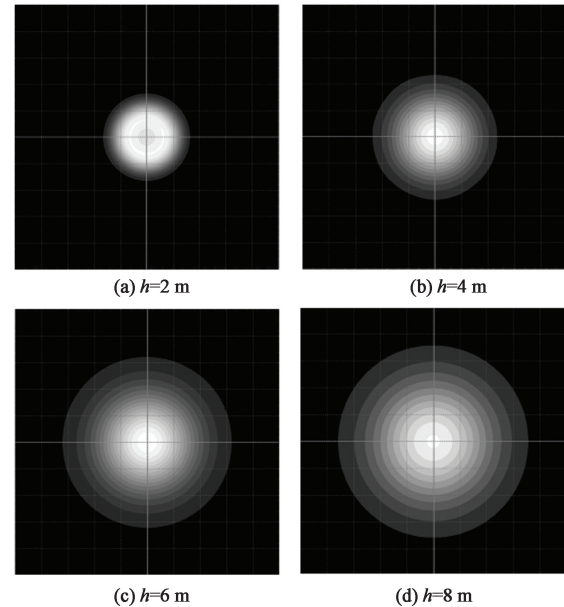


图 6 环形阵列光斑分布

Fig.6 Facula distribution of circular array

3.2 LED 方形阵列

LED 方形阵列的分布结构如图 7 所示,方形阵列对称分布在 xy 平面原点处,单个 LED 光源之间的间距设为 d ,设方形阵列分布为 $N \times N$ 的结构形式,通过线性叠加,可得被照面上任意一点的照度分布。当 N 为奇数时:

$$E(x, y, z) = z^m I_0 \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{l=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{1}{[(x-nd)^2 + (y-l d)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}}, \quad (11)$$

当 N 为偶数时:

$$E(x, y, z) = z^m I_0 \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \frac{1}{[(x-(2n-1)\frac{d}{2})^2 + (y-(2l-1)\frac{d}{2})^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}}, \quad (12)$$

本光源为 11×11 LED 阵列,为实现均匀照明,便于与环形阵列对比,取 $d = 0.04$ m,通过 Matlab

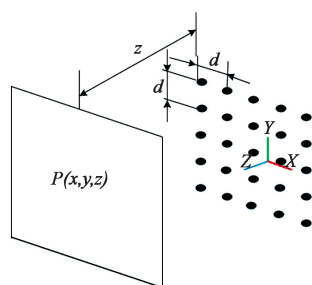


图 7 方形阵列布局示意图

Fig.7 Schematic diagram of square array

计算出目标距离 1~13 m 方形阵列对应的光斑半径 R 、发光角度 α 及中心照度 E_0 , 如表 2 所示。

表 2 方形阵列光斑半径 R 、发光角度 α 及中心照度 E_0 Tab.2 Spot radius R , the luminous angle α and the center illumination E_0 of square array

h/m	E_0/lx	R/m	$\alpha/(\circ)$
1	532.22	0.365 8	18.82
2	264.42	0.563 2	20.58
3	134.65	0.773 3	21.64
4	78.12	0.994 4	22.47
5	50.4	1.226	23.19
6	35.5	1.458 8	23.70
7	27.04	1.693 8	24.10
8	22.14	1.929 6	24.40
9	18.37	2.167 4	24.65
10	14.92	2.404	24.85
11	12.36	2.642	25.03
12	10.4	2.878 4	25.16
13	8.87	3.105 5	25.19

利用最小二乘法对表 2 数据进行幂函数拟合, 可得方形阵列中心照度随目标距离 h 变化曲线如图 8 所示, 函数表达式为:

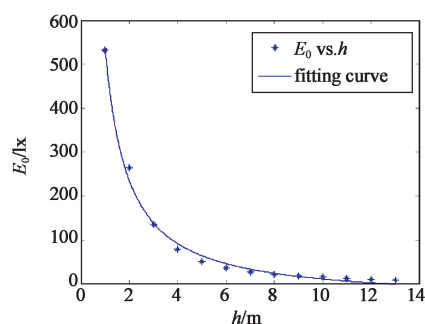
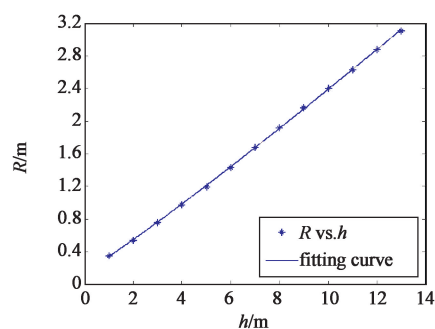
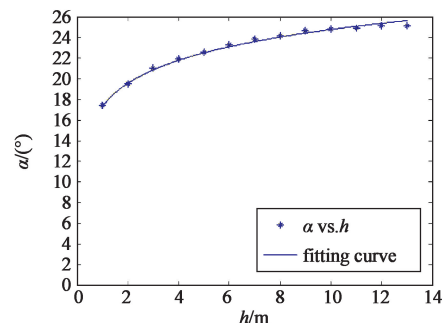
$$E_0 = -36.88 + 575.4h^{-1.0792} \quad (13)$$

方形阵列光斑半径随目标距离 h 的变化曲线如图 9 所示, 函数表达式为:

$$R = 0.16316 + 0.19181h^{1.0663} \quad (14)$$

方形阵列发光角度随目标距离 h 的变化曲线如图 10 所示, 函数表达式为:

$$\alpha = -174.28 + 193.01h^{0.013581} \quad (15)$$

图 8 中心照度随 h 的变化曲线Fig.8 Center illumination curve varying with h 图 9 光斑半径随 h 的变化曲线Fig.9 Spot radius curve varying with h 图 10 发光角度随 h 的变化曲线Fig.10 Luminous angle curve varying with h

为了更直观地表示方形阵列中心照度、光斑半径和发光角度随目标距离的变化规律, 对 3 个光学参数分别求变化率, 如图 11 所示, 可得随目标距离的增大, 方形阵列中心照度 E_0 先急剧减小后缓慢减小; 光斑半径 R 近似呈线性增长; 发光角度 α 先增长较快后缓慢增加, 并逐渐趋于稳定。

利用 TracePro 软件仿真不同目标距离下的照射光斑图, 如图 12 所示, 可得随着目标距离增大, 中心照度逐渐变小, 光斑半径逐渐变大, 且在

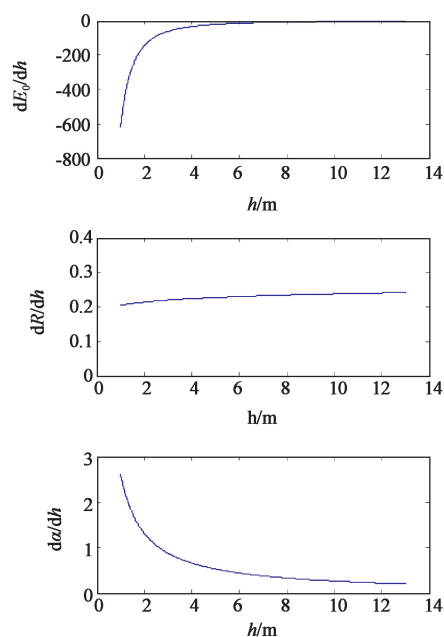


图 11 方形阵列曲线变化率

Fig.11 Rate of curve change of square array

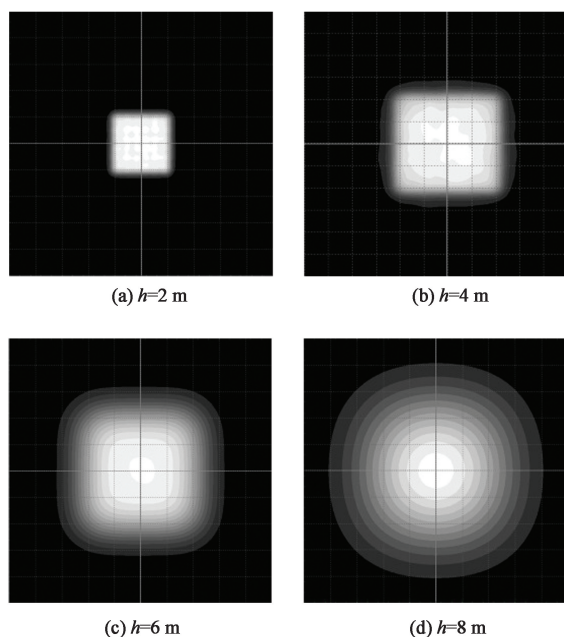


图 12 方形阵列光斑分布

Fig.12 Facula distribution of square array

近场区域内($h < 8$ m)方形阵列照射光斑几乎为方形,随着目标距离不断增大,方形逐渐过渡为圆形。

通过表 1、表 2 数据及 TracePro 仿真可得:随着目标距离的增大,两种阵列中心照度均减小,光斑半径均增大,发光角度逐渐增大并趋于稳定,且在目标距离为 1~8 m,环形阵列光斑半径和发光角度较小,中心照度较大,有较好的聚光性。方形阵列光斑半径和发光角度较大,中心照度较小,照射范围较广。在目标距离为 8 m,方形阵列过渡为圆形光斑,两种阵列的中心光强、光斑半径、发光角度基本趋于一致。

通过对发光角度计算,构造的环形、方形阵列均满足《民用飞行区技术标准》对跑道警戒灯主光束发光角度要求。本文以 4C 级机场为例,机场滑行道宽度为 15 m,常用机型眼-轮高约为 2 m,飞行员目视警戒灯的遮挡角约为 20° ,通过计算可得飞行员与 A 型警戒灯的距离为 9.5 m,大于 8 m,因此环形阵列与方形阵列均可适用;B 型警戒灯与飞行员距离为 5.8 m,由于 8 m 前方方形 LED 阵列较环形阵列发光角度大,斜向可视性好,中心照度小,不易对飞行员造成眩光,故 B 型警戒灯适于采用方形 LED 阵列。

4 结 论

本文针对机场跑道警戒灯进行研究,利用 121 个 LED 光源构造环形、方形 LED 阵列模型,分析两种阵列的发光特性并进行对比,得出在不同的目标距离下,两种阵列的中心照度、光斑半径和发光角度变化规律,通过分析可得:当目标距离小于 8 m 时,两种阵列发光特性存在差异,目标距离大于 8 m 时,两种阵列的发光特性趋于一致,并以 4C 级机场为例,分析得出环形、方形阵列对 A 型警戒灯均适用,B 型警戒灯适于采用方形阵列。

参 考 文 献:

- [1] WANG K, LIU S, CHEN F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(10): 105501.
- [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 layer [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(6): 645-650. (in Chinese)
- [3] 吴淑梅,霍彦明,谭俊延,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]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(2): 299-302. (in Chinese)
- [4] 纪永成,刘士浩,刘文博,等.单向发射的透明红光有机发光器件[J].发光学报,2014,35(11):1354-1358.
JI Y C, LIU S H, LIU W B, *et al.* One-direction-emission red transparent organic light-emitting devices [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(11): 1354-1358. (in Chinese)
- [5] 陈新睿,韩敬华,李洪儒,等.基于近场均匀照明的LED阵列的优化设计[J].应用光学,2014,35(1):122-127.
CHEN X R, HAN J H, LI H R, *et al.* Optimal design of LED arrays for near-field uniform illumination [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122-127. (in Chinese)
- [6] 向东旭,李海蓉,谢龙珍,等.发光层位置对白光有机发光二极管的影响[J].发光学报,2015,36(7):821-828.
XIANG D X, LI H R, XIE L Z, *et al.* Influence of light-emitting layer position on white organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(7): 821-828. (in Chinese)
- [7] MORENO I, AVENDAÑO-ALEJO M, TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [8] 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.
WANG J W, SU Z P, YUAN Z J, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0822004. (in Chinese)
- [9] 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]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(12): 1677-1682. (in Chinese)
- [10] 赖伟,陈伟民,雷小华,等.平面LED阵列远场条件研究与实验验证[J].光学技术,2011,37(3):269-274.
LAI W, CHEN W M, LEI X H, *et al.* Research on the far-field condition of flat LED array and experimental verification [J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 269-274. (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 Optica 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]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 742-747. (in Chinese)
- [14] 宋宁亮.基于软件仿真的LED照明设计与应用[D].厦门:厦门大学,2014.
SONG N L. LED lighting design and application based on simulation [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014. (in Chinese)
- [15] 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]. *Optical Instruments*, 2016, 38(6): 505-511. (in Chinese)

作者简介:侯启真(1966—),女,天津人,硕士,副教授,主要从事机场目视助航系统、机场运行与保障技术等方面的研究。

E-mail: qzhhou@cauc.edu.cn

薛荣荣(1993—),男,山西运城人,硕士研究生,主要从事机场目视助航设施方面研究。E-mail: rrxuecauc@163.com