

doi:10.3788/gzxb20144308.0822004

LED 阵列模组化中的照度均匀性问题

王加文¹, 苏宙平^{1,2}, 袁志军³, 朱益清¹

(1 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214122)

(2 无锡来德电子有限公司, 江苏 无锡 214072)

(3 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘 要:为使 LED 阵列在目标面上产生均匀的照度分布, 构建一个均匀度评价函数, 通过优化阵列中各 LED 的位置, 使得评价函数产生最小值, 此时阵列在照明面上的均匀度最高. 采用模拟退火算法对 LED 集成圆形阵列、 4×4 和 4×5 的矩形阵列进行优化, 优化后的阵列在目标面上均产生了均匀照度分布, 对应的均匀度分别为 97%、96% 和 95%. 对 LED 阵列中影响目标面均匀照度的参量进行研究, 结果表明圆形阵列的最佳半径与 LED 的颗数无关, 阵列面和目标面之间的距离与阵列的最佳半径呈线性关系; 矩形阵列中, 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. 该方法与现有解析方法所得结果一致, 且算法简单便捷, 可用于计算机自动优化设计.

关键词:照明工程; LED; 优化; 均匀度; 评价函数

中图分类号: O435; O432.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0822004-7

Study on Uniformity of LED Array Illumination Distribution on Target Plane

WANG Jia-wen, SU Zhou-ping, YUAN Zhi-jun, ZHU Yi-qing

(1 School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214112, China)

(2 Wuxi led electronics company, Wuxi, Jiangsu 214072, China)

(3 Shanghai key laboratory of all solid-state laser and applied techniques, Shanghai 201800, China)

Abstract: Global optimization algorithm was proposed to optimize and design LED array for generating uniform illumination distribution on target plane. An evaluation function reflecting illumination uniformity was constructed, which can reach the minimum by optimizing the LEDs positions. While the evaluation function takes the minimum value, the optimal LED array can produce highly uniform illumination distribution on target plane. The minimum value of evaluation function was found by simulated annealing algorithm, so that the circular array consisting of 12 LEDs, 4×4 and 4×5 rectangular LED array were optimized. After optimization, the three arrays produce highly uniform illumination distribution with the calculated uniformity 97%, 96% and 95%, respectively. The results show that the optimal radius of circular array does not depend on the number of LEDs. The optimal radius depends linearly on the distance between LED array plane and the target plane. For the rectangular array, the optimal separation between adjacent LEDs depends linearly on the distance between LED array plane and the target plane. The results of the proposed method were consistent with existing method, and the algorithm is simple and convenient.

Key words: Illuminating engineering; LED; Optimization; Uniformity; Merit function

OCIS Codes: 220.0220; 220.2945; 220.4298

基金项目:国家自然科学基金(No. 60908041)和上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(No. 2012ADL03)资助

第一作者:王加文(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 LED 照明技术. Email: lyjiawen@163.com

导师(通讯作者):苏宙平(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计、LED 照明技术. Email: zpsu_optics@aliyun.com

收稿日期:2013-12-10; **录用日期:**2014-03-28

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

LED作为新型光源具有节能、环保、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^[1-8].由于受制造技术和工艺水平限制,单颗LED产生的功率极为有限,限制了其在多数照明领域的应用.将多颗LED集成为一个LED阵列模组用于照明,能够有效解决单颗LED照明中通量不足的问题.合理排列LED阵列,使其在照明面(特别是近场照明)产生照度均匀的分布,对提高照明品质具有重要的意义,国内外对实现LED阵列照度均匀化的工作开展了一系列的研究.文献[9]通过推导阵列中相邻LED之间的最佳距离表达式,来设计最佳的LED阵列,该阵列主要是用于近场照明.文献[10]设计了球形LED阵列,所有LED均匀分布在一个球面上,球形阵列可以将光分布在更大的照明面上.文献[11]从信号处理的角度设计LED阵列来产生均匀的照度分布,通过对几种基本照明模式进行组合,可以产生均匀的照明效果.文献[12]通过面裁剪技术设计了一个自由曲面的透镜,透镜可以改变LED发光视角,对改变发光视角后的LED进行阵列模组化也产生了均匀的照度分布.文献[13]对大视角的LED阵列在目标面上产生均匀照度分布的条件进行了分析,LED的光强分布不是随LED视角单调增加,通过解析方法推导了照度分布均匀性的条件.文献[9-13]均使用解析方法设计最佳LED阵列分布,使其在照明面上产生均匀的照度分布.文献[14]中首次使用数值优化的方法优化了几个LED阵列,这些阵列在目标面上都产生了均匀的照度分布,但是并没有对影响LED阵列在目标面上均匀度的重要参量进行研究.

本文构建评价函数,使用模拟退火算法对圆形和矩形阵列进行优化设计,并对一些重要参量对均匀度的影响也进行了研究.

1 LED阵列模组化中的理论模型及评价方法

单颗LED芯片发出的光满足朗伯分布,即光强与发散角满足^[10,12]

$$I = I_{\text{LED}} \cos^{m+1} \theta \quad (1)$$

I_{LED} 是LED芯片中心的光强, θ 是光线的发射角度.

假设目标面上有一点 $P(x_i, y_j, z)$,单颗LED在 P 点处产生的照度为^[10,12,14]

$$E(x_i, y_j, z) = \frac{z^{m+1} I_{\text{LED}}}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{\frac{m+3}{2}}} \quad (2)$$

如果有 t 颗LED光源,则在 $P(x_i, y_j, z)$ 处产生的光照强度是^[10,12,14]

$$E(x_i, y_j, z) = \sum_{n=1}^t \frac{z^{m+1} I_{\text{LED}}}{[(x-X_n)^2 + (y-Y_n)^2 + z^2]^{\frac{m+3}{2}}} \quad (3)$$

式中 X_n, Y_n 分别表示第 n 颗LED的坐标值.

定义LED的照度均匀度 u 为照明面上各点照度的平均值与最大照度值的比值为^[12]

$$u = \bar{E} / E_{\text{max}} \quad (4)$$

式中 \bar{E} 为照度的平均值,即

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E(x_i, y_j, z) \cdot \frac{1}{M \times N} \quad (5)$$

E_{max} 为照明面上照度的最大值.

构建评价函数 F 用于优化设计LED阵列排布,则

$$F = 1 - u = 1 - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E(x_i, y_j, z) \cdot \frac{1}{M \times N} \cdot \frac{1}{E_{\text{max}}} \quad (6)$$

可知当照明面上的照度越高,评价函数的值越小.

$$F = 1 - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^t \frac{z^{m+1} I_{\text{LED}}}{[(x_i - X_n)^2 + (y_j - Y_n)^2 + z^2]^{\frac{m+3}{2}}} \cdot \frac{1}{M \times N} \cdot \frac{1}{E_{\text{max}}} \quad (7)$$

从式(7)可以看出评价函数的自变量是LED坐标,通过寻找最佳的LED坐标,可以使评价函数的值最小,从而使目标面上的照度均匀性达到最好,因此关于LED阵列照度均匀性的问题就转化为寻找评价函数最小值的问题.寻找函数最小值可以通过全局优化算法来实现,如遗传算法、模拟退火算法等,本文将采用模拟退火算法.图1为单颗LED照明示意图.

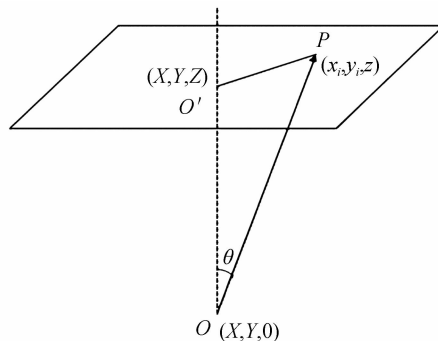


图1 单颗LED照明示意图

Fig. 1 Schematic of single LED illumination

2 优化算法的设计

模拟退火算法的原理是先给定一个初始温度,通过缓慢下降温度参量,使算法能够在短时间内给出一个近似最优解^[15].

2.1 模拟算法的一般过程

模拟退火算法流程如图2^[14,16].在优化之前设置初始参量, T 为退火温度, L 是在每个固定温度下的最大迭代次数, IT 是迭代计数器.在开始的时候随机产生一组初始的解,作为阵列中各LED的初始位置坐标.

在降温过程中,不难发现随着温度 T 的下降, $\exp(-\Delta f/kT)$ 的值也在逐渐减小,也就是说在 $\Delta f > 0$ 时, S' 被接受为新解的概率随着温度的降低而减小,一直到 $T \rightarrow 0$ 时, $\exp(-\Delta f/kT) \rightarrow 0$,算法只接受 $\Delta f < 0$ 时的解.

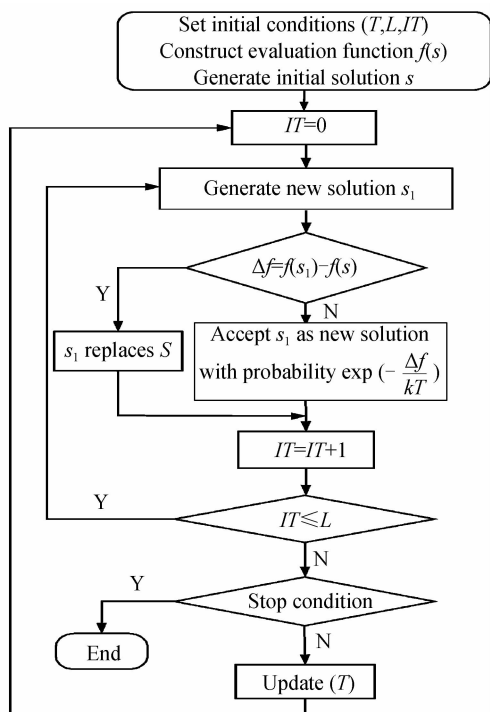


图2 模拟退火算法流程图

Fig. 2 The flow chart of simulated annealing algorithm

2.2 模拟退火算法的参量控制问题

模拟退火的算法在不同的运用情况下对参量有不同的要求,主要表现在四个方面^[16]:

1) 温度 T 的初始值设置问题. 初始温度 T 的设定对寻找全局最优解有着很大的影响.

2) 温度更新函数的选择. 温度更新函数是指温度下降的方式,通常有三种:指数降温、逻辑降温和线性降温,实际运用过程中还可经其它方式降温,例如按照式(8)的方式降温,即

$$T(n+1) = hT(n) \quad (8)$$

式中 h 为小于 1 的正数, n 为降温的次数.

3) 搜索步长. 在寻找新解过程中,如果步长过小则可能在某个极小值附近难以跳出去;若步长过大则可能越过最优解.

4) 最大迭代次数. 最大迭代次数对寻找最优解非常重要的. 次数太少迭代过程可能在没找到最优解时就结束,过大则会影响到运算时间.

3 设计实例及影响均匀度参量分析

3.1 圆形 LED 阵列排布

设计了 12 颗 LED 构成的圆形阵列,将目标面取在距离光源 15 mm 的地方,即 $z=15$ mm,目标面选取大小为 5 mm×5 mm 的一个方形区域.

首先将目标面网格化,画出 100 个网格点,每一个网格点对应一个照度值.然后列出照度值的表达式.因所有 LED 均匀分布在一个圆上,只要获得圆形阵列的半径,阵列中所有 LED 的位置坐标都可以得到.圆形

LED 阵列在目标面上的照度分布为^[12]

$$E_n(x, y, z) = z^{m+1} I_{LED} \sum_{n=1}^N \left[\left(x - \rho \cos \left(\frac{n}{N} 2\pi \right) \right)^2 + \left(y - \rho \sin \left(\frac{n}{N} 2\pi \right) \right)^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+1}{2}} \quad (9)$$

式中 $N=12$,表示选择的 LED 颗数; n 表示第 n 颗 LED; ρ 表示的是圆形的半径.将式(9)代入评价函数式(7),利用模拟退火算法寻找评价数的最小值,优化变量是圆的半径.经过优化,得到最佳半径值为 11.47 mm.图 3 为优化过程中,评价函数随优化代数之间的关系.当评价函数的改变量小于预先设定的改变量时优化停止.优化后的阵列如图 4,图 5 为优化后的 LED 阵列照明系统图.

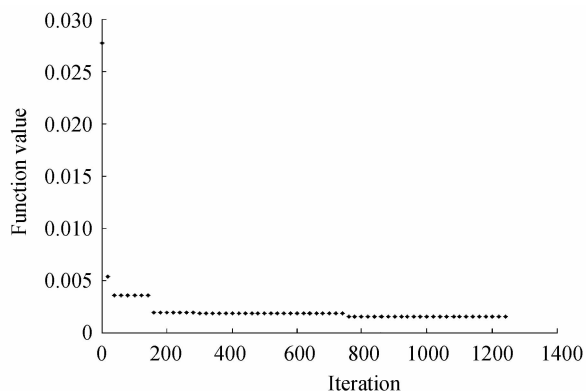


图3 评价函数随优化次数的关系

Fig. 3 The dependence of merit function on iteration count

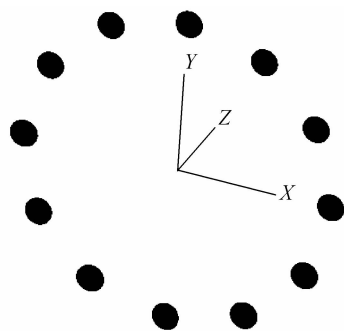


图4 优化后的圆形 LED 排列

Fig. 4 The optimized circular LED array

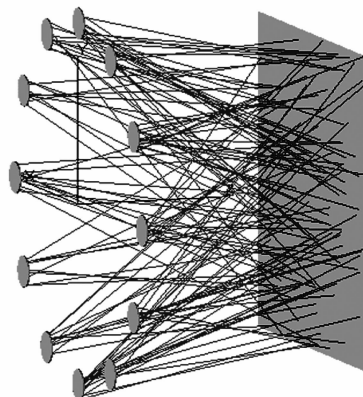


图5 优化后的圆形阵列照明系统图

Fig. 5 The optimized circular LED array illumination system

图 6 为优化后的 LED 阵列在目标面上产生的照度分布及轮廓,均匀度计算结果为 97.86%。在相同的约束条件下,优化了不同颗数 LED 构成的圆形阵列,图 7 是圆形阵列的最佳半径随 LED 颗数变化关系,可

以发现不同颗数的 LED 形成的阵列,其对应的最佳半径几乎不变,这与文献[12]中通过解析方法得到的结论一致。

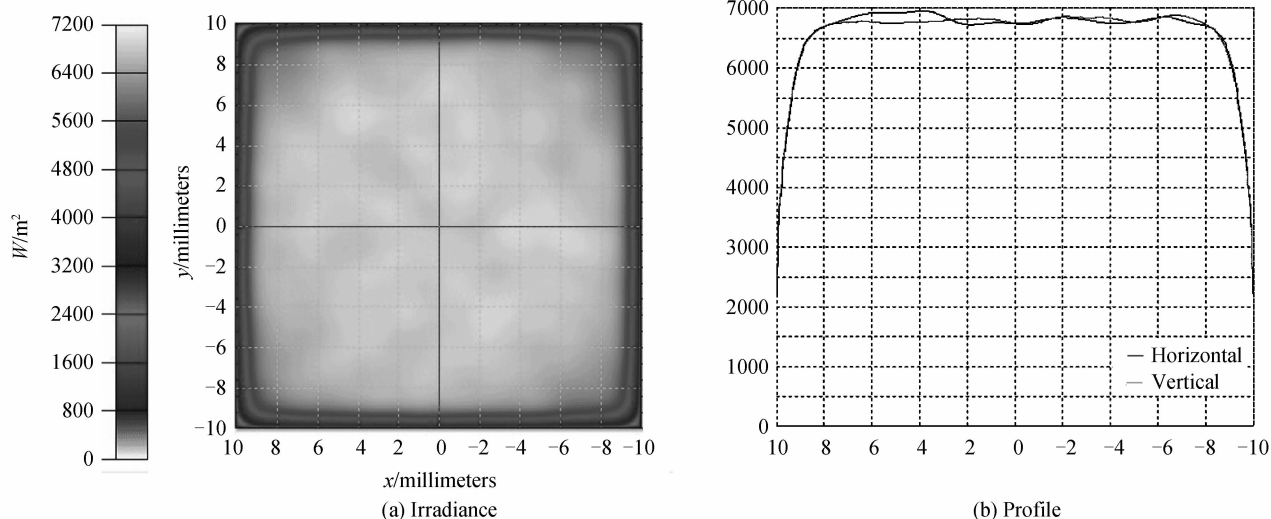


图 6 优化后圆形阵列的照度及轮廓

Fig. 6 The irradiance map and profile generated by the optimized circular LED array

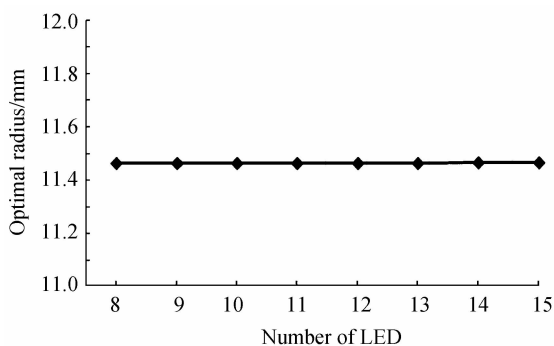


图 7 不同颗数 LED 形成的圆形所对应的最佳半径值
Fig. 7 The optimal radius of circular arrays with various number of LED

图 8 为 LED 阵列平面和目标面之间的距离与最优 LED 阵列半径之间的关系,可以看出最佳半径与 LED 阵列平面离目标面的距离几乎成正比。

此外,选取 7 组初始半径从 3 mm 变化到 15 mm 的数据进行优化,如图 9,最终优化出来的半径均为 11.3 mm 左右,可知初始半径对优化的结果几乎没有影响,说明该算法是可行的。

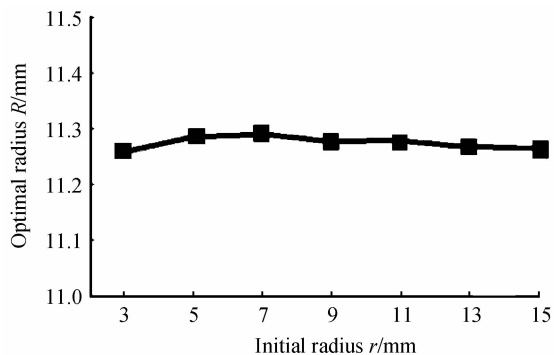


图 9 初始半径与最佳半径之间的关系

Fig. 9 The dependence of initial radius of on the optimal radius for circular array

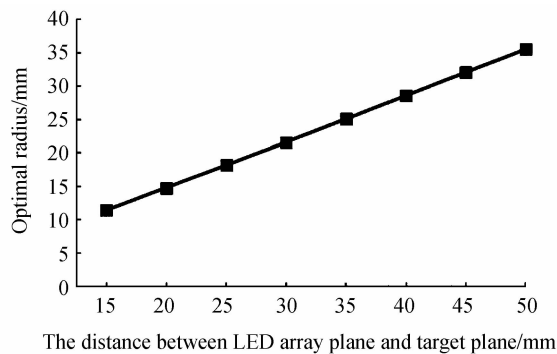


图 8 LED 阵列平面和目标面之间距离与最优半径的关系
Fig. 8 The influence of distance between LED array plane and target plane on the optimal radius of circular array

3.2 方形 LED 阵列排布

设计一个方形 LED 阵列,由 16 颗 LED 构成,形成一个 4×4 阵列,相邻两个 LED 之间的距离都设定为相等,该距离即为要优化的变量.初始 LED 坐标如图 10.

将图 10 中的坐标带入评价函数式(7),利用模拟退火的方法优化相邻 LED 之间的距离,优化结果为 $d=12.79$ mm.优化之后的方形 LED 阵列如图 11.该阵列在目标面上产生的照度分布图和轮廓图如图 12,均匀度为 96.39%.同样,矩形分布的 LED 阵列在优化

之后,相邻 LED 之间的最佳间距也与目标面的距离成正比,如图 13 所示。

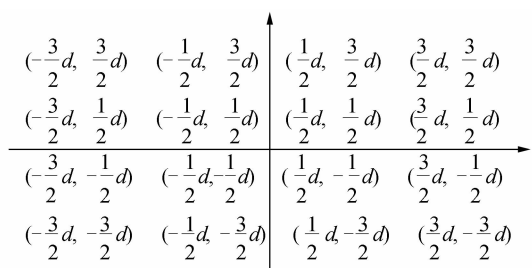


图 10 4×4 阵列排布的坐标图
Fig. 10 Schematic of 4×4 LED array

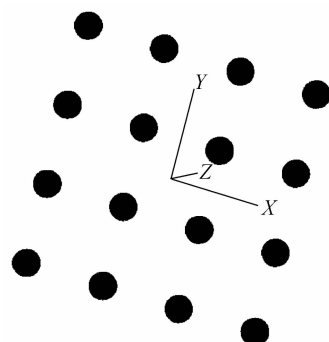


图 11 优化后的 4×4 阵列排布
Fig. 11 The optimized 4×4 LED array

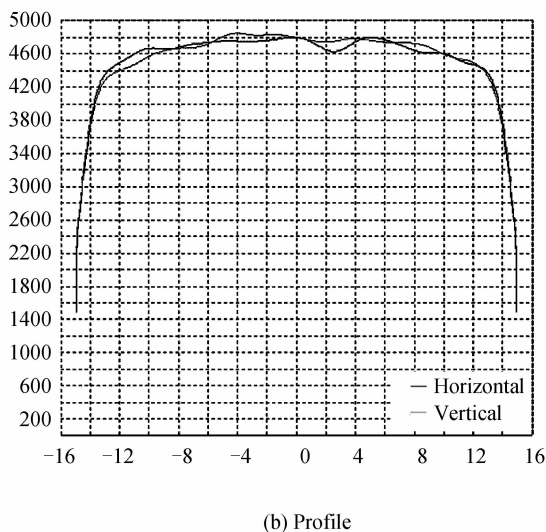
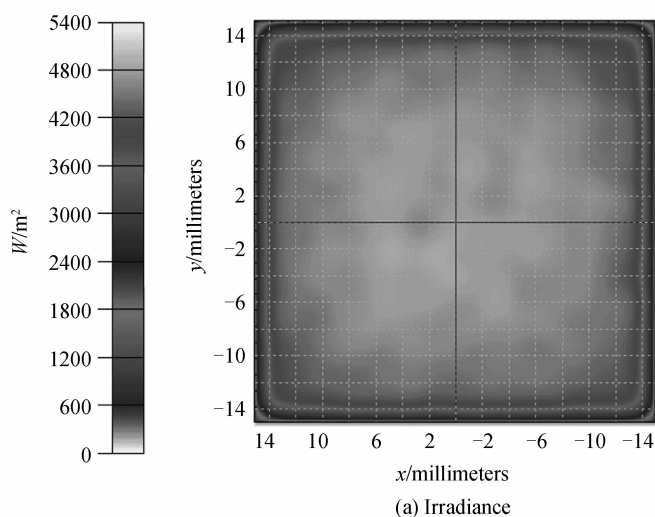


图 12 优化后的 4×4 阵列的照度分布及轮廓

Fig. 12 The irradiance map and profile generated from the optimized 4×4 LED array

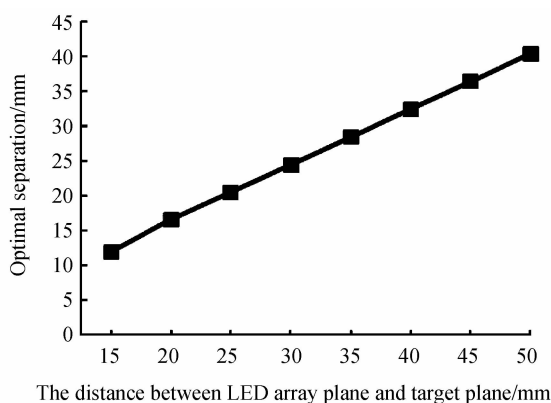


图 13 最佳间距随 LED 阵列面与目标面间距离的变化关系
Fig. 13 The independence of the optimal separation on the distance between LED array plane and target plane

对于一个 4×5 的矩形阵列,在排布中,由于 x 轴方向和 y 轴方向的颗数不同,可能会出现不同的间隔,所以将 x 方向的间距定义为 d_x ,y 方向的间距定义为 d_y ,LED 的初始坐标如图 14,仍然使用式(7)作为评价函数。这个优化的阵列中有两个要优化的变量 d_x 、 d_y 。通过模拟退火算法可以得到最佳横向和纵向间距 $d_x = 11.54 \text{ mm}$, $d_y = 12.99 \text{ mm}$ 。优化之后的 LED 阵列

分布图如图 15,图 16 为优化后的 LED 阵列在目标面

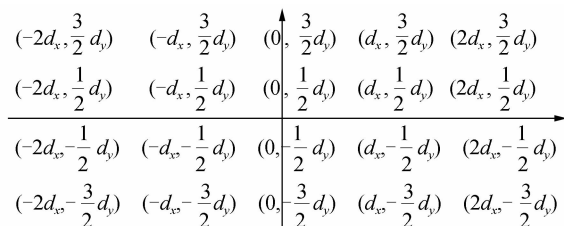


图 14 4×5 阵列排布的坐标图
Fig. 14 The 4×5 LED array

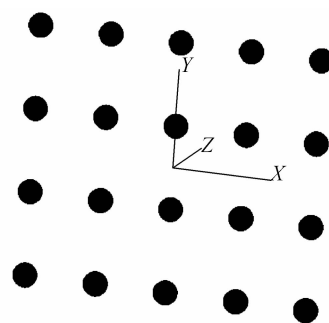


图 15 4×5 阵列排布的效果图
Fig. 15 The optimized 4×5 LED array

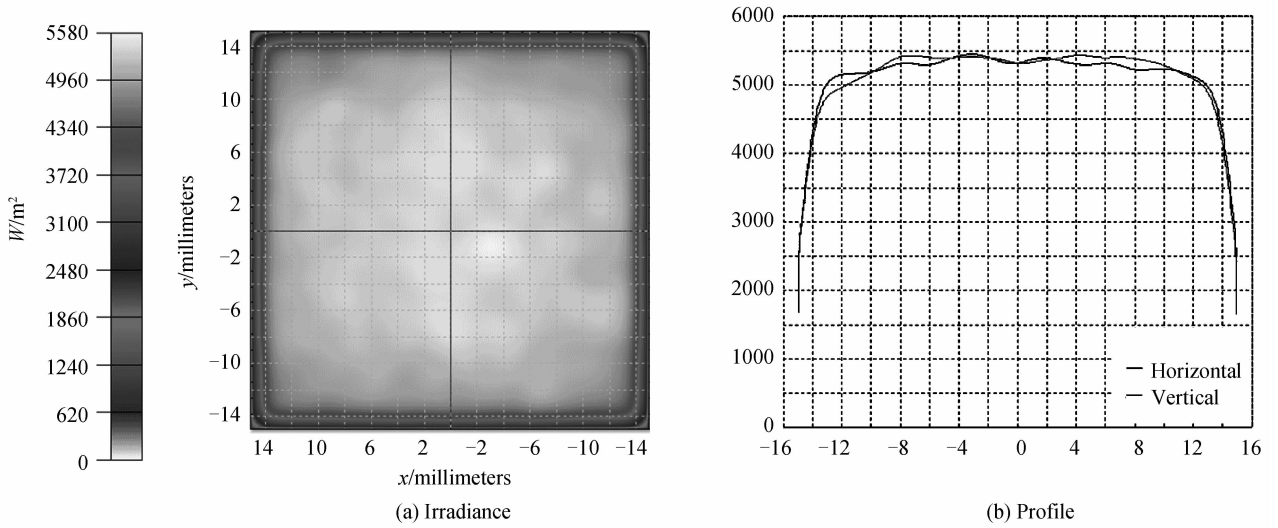


图 16 4×5 阵列排布的照度分布图(左)及轮廓图(右)

Fig. 16 The irradiance map (left) and profile (right) generated from the optimized of 4×5 LED array

上产生的照度分布,可以看出照度分布很均匀,均匀度计算结果为 95.19%.

3.3 理论计算与实验结果比较

为了进一步证明该方法的可行性,将所优化出来的结果与文献[9]中的实验结果相比较.采用与文献[9]中相同的初始结构参量:LED阵列平面与目标平面之间的距离为 $z=97.4$ mm, $\theta_{1/2}=8.44^\circ$ ($\theta_{1/2}$ 为光强降为中心光强一半时,所对应的视角,与 m 有关), $m=$

64.66.使用模拟退火算法进行优化,优化之后的LED阵列如图 17(a).获得相邻LED之间的最佳距离为 18.5 mm,与文献[9]中使用解析计算获得的结果及实验分析结果完全一致,优化之后的LED阵列在目标面上产生的2-D和3-D照度图分别如图 17(b)和(c)所示,图 17(d)表示了LED阵列在 x 方向上的照度分布,可以看出照度非常均匀,由于该阵列为线阵列,因此优化的是 x 方向上的照度分布.

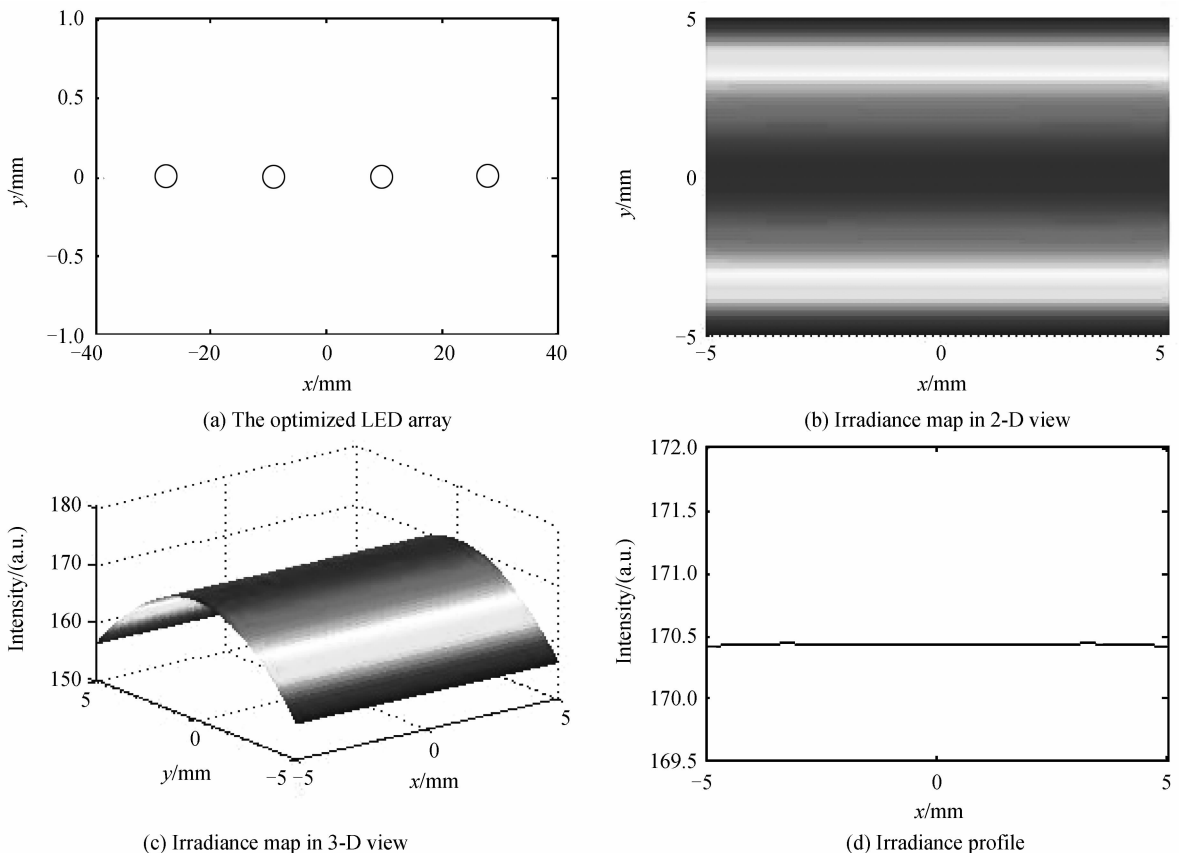


图 17 优化后的线性 LED 阵列及其照度分布于轮廓图

Fig. 17 The irradiance map and profile of the optimized linear LED array

4 结论

本文通过构建评价函数,运用模拟退火算法优化设计了三个LED阵列:12颗LED集成圆形阵列,4×4和4×5的矩形LED阵列.经过优化,在目标面上均产生了均匀的照度分布,对应的均匀度分别为97%、96%和95%.同时也探索了影响LED阵列在目标面照度均匀性的一些参量.研究结果表明了圆形阵列最佳半径与LED的颗数无关,阵列面和目标面之间的距离与阵列的最佳半径呈线性关系.使用模拟退火算法,初始半径的设置对优化最佳半径几乎没有影响.对于矩形阵列,相邻LED之间的距离与阵列面和目标面之间的距离呈线性关系.所提优化方法简单便捷,可以用计算机完成自动优化设计.

参考文献

- [1] DING Y, LIU X, ZHENG Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Optics Express*, 2008, **16** (17): 12958-12966.
- [2] SU Zhou-ping, QUE Li-zhi, ZHU Zhuo-wei, *et al.* Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 022203.
苏宙平, 阙立志, 朱焯炜, 等. 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.
- [3] SUN C C, CHEN C Y, HE H Y, *et al.* Precise optical modeling for silicate-based white LEDs[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(24): 20060.
- [4] SUN C C, CHIEN W T, MORENO I, *et al.* Analysis of the far-field region of LEDs[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(16): 13918.
- [5] 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.
- [6] DING Yi, ZHEN Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.
- [7] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1351-1355.
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.
- [8] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua, *et al.* A light distribution proposal for designing LED dipped head light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2904-2908.
吴仍茂, 屠大维, 黄志华, 等. 一种LED汽车前照近光灯配光设计方案[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2904-2908.
- [9] 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.
- [10] MORENO I, MUÑOZ J, IVANOV R. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array [J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(3): 33001-33001.
- [11] YANG H, BERGMANS J W M, SCHENK T C W, *et al.* Uniform illumination rendering using an array of LEDs: a signal processing perspective [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, **57**(3): 1044-1057.
- [12] WHANG A J W, CHEN Y Y, TENG Y T. Designing uniform illuminance systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *Journal of Dispersion and Technology*, 2009, **5**(3): 94-103.
- [13] QIN Z, WANG K, CHEN F, *et al.* Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 17460-17476.
- [14] SU Zhou-ping, XUE Dong-lin, JI Zhi-cheng. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(S6): 843-855.
- [15] 卓金武. MATLAB在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011:83-85.
- [16] 张永恒. 工程优化设计与MATLAB实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2011:204-205.