

文章编号: 1000-7032(2019)03-0340-09

光量子体系下基于粒子群算法的 LED 植物照明光源设计

唐浩洲¹, 文尚胜^{1,2*}, 符 民^{1,2}, 何 果¹, 张槐洋¹, 廖少雄³, 康丽娟^{4*}

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 广州虎辉照明科技公司, 广东 广州 510170; 4. 华南师范大学 美术学院, 广东 广州 510631)

摘要: 在现代农业生产中,常采用发光二极管(LED)作为植物照明光源对农业作物进行补光,为提高LED植物照明阵列光源的均匀度,本文在光量子体系下,提出一种新的基于粒子群算法的LED植物照明阵列光源设计方法。通过MATLAB对红蓝光LED植物光源阵列进行数学建模,运用粒子群算法寻找高均匀度条件下的红蓝光LED坐标,设计出二维情况下的红蓝光LED排布阵列;在三维情况下,为解决维度升高时可能会导致的求解陷入局部极小问题,采用改进的随机惯性权粒子群算法进行三维方案设计,并使用Tracepro对两种设计方案进行验证,与传统的红蓝光LED等间距逐行排列设计进行了对比。研究表明,与常见逐行排列LED阵列设计达到的光量子通量密度(PPFD)均匀度为79.6%相比,通过粒子群算法寻优的设计方法,二维设计方案的PPFD均匀度达到88.7%,较等间距逐行排列设计提高了9.1%;三维设计方案的PPFD均匀度达到92.6%,较二维设计方案提高了3.9%,较等间距逐行排列设计提高了13%。本实验证明了运用粒子群算法在二维和三维空间进行LED植物照明阵列光源设计的可行性,在简易设计流程的同时,提高了工作效率。

关键词: 粒子群算法; LED; 光学设计; 均匀度; 植物工厂

中图分类号: TN312⁺.8; TM923.01 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194003.0340

Design of LED Plant Lighting Source Based on Particle Swarm Optimization Algorithm Under Photons System

TANG Hao-zhou¹, WEN Shang-sheng^{1,2*}, FU Min^{1,2}, HE Guo¹,
ZHANG Huai-yang¹, LIAO Shao-xiong³, KANG Li-juan^{4*}

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Tigerfire (Guangzhou) Lighting Technology Corporation, Guangzhou 510170, China;

4. Academy of Fine Arts, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

* Corresponding Authors, E-mail: shshwen@scut.edu.cn; kangyuan@senu.edu.cn

Abstract: In modern agricultural production, Light emitting diode(LED) is often used as a plant lighting source to supplement the agricultural crops. In order to improve the uniformity of the light source of LED plant lighting array, a new design method based on improved particle swarm optimization(PSO) of LED plant illuminated array light source is proposed in this paper. The mathematical

收稿日期: 2018-05-21; 修订日期: 2018-08-20

基金项目: 广东省科技计划(2017B010114001, 2015B010127004); 广东省应用型科技研发专项(2015B010134001); 广州市科技计划(201604040004, 201604016010, 201704030140); 广东省扬帆计划(2015YT02C093); 中山市科技计划(2016A1009, 2017C1011, 2018A10013)资助项目

Supported by Science and Technology Plan Programs of Guangdong Province(2017B010114001, 2015B010127004); Special Application of Science and Technology Research and Development in Guangdong Province(2015B010134001); Research and Cooperation with Major Innovation Projects of Guangzhou City(201604040004, 201604016010, 201704030140); Sail Plan in Guangdong Province(2015YT02C093); Science and Technology Plan Programs of Zhongshan(2016A1009, 2017C1011, 2018A10013)

modeling of the red and blue light LED plant light source array is carried out by MATLAB, and the red and blue light LED coordinates are found under the condition of high uniformity using the particle swarm optimization algorithm, and the red and blue light LED arrangement array in the two-dimensional case is designed. The stochastic inertia weight particle swarm optimization (random inertia particle swarm optimization) algorithm is used to design the three-dimensional scheme, and the two design schemes are verified with Tracepro and compared with the traditional red and blue light LED. The results show that, compared with the uniformity of the optical quantum flux density (Photosynthetic photon flux density, PPF) designed by the common line by line array LED array, the uniformity of the two-dimensional design scheme is 88.7% by PSO optimization method, and the design is improved by 9.1% compared with the line by line arrangement. The PPF uniformity of the 3D design is 92.6%, which is 3.9% higher than that of the two-dimensional design, and 13% higher than that of the equal spacing row by row arrangement. This experiment proves the feasibility of using PSO to design the light source of LED plant lighting array in two-dimensional and three-dimensional space, and improves the work efficiency at the same time in the simple design process.

Key words: particle swarm optimization; light emitting diode; optical design; uniformity; plant factory

1 引言

随着人口的不断增长以及耕地资源的日益紧张,粮食来源匮乏成为全世界亟待解决的问题,为了提高粮食产量和避免因环境污染造成的食品安全问题,中国、日本和荷兰等国都将建立现代化的设施农业体系和植物工厂设为发展目标^[1-2]。在植物生长中,光照会影响植物的光合作用速率,进而对植物的干重、叶面积和生长形态产生影响^[3],因此对植物照明光源的设计成为设施农业中的一个重要环节^[4]。发光二极管(Light emitting diode, LED)因其具有光电转换效率高、低能耗、寿命长、光配比易调节等特点,近些年被广泛用于植物照明中^[5-7],但由于LED的出光具有一定的方向性,在进行大面积的植物补光时,会因为光照的分布不均导致植物表面存在局部过暗或局部过亮的情况,使同一批次产品的生长情况出现差异,给植物照明光源的光配比及营养液的选取带来极大的不便^[8],因此需要通过对LED植物照明光源进行二次光学设计,以提高其光量子通量密度(Photosynthetic photon flux density, PPF)均匀度,进而改善生产效率。

粒子群算法是一种解决多目标优化问题的寻优算法,在电力系统领域、图像处理领域得到

了成功应用^[9],与其他智能优化算法相比,其具有实现方式简易、效率较高等优势^[10-12]。本文采用粒子群算法对红蓝光LED芯片数为2:1的LED阵列光源进行设计,在MATLAB上编程实现粒子群算法的寻优过程,得出二维和三维情况下的两种LED芯片排列位置参数,使用Tracepro对所得方案进行仿真模拟,并与常见的逐行排列LED阵列的光照效果进行对比,验证了用粒子群算法进行寻优设计的可行性,设计出一种具有高PPFD均匀度的三维LED植物照明阵列光源。

2 实验模型

本实验采用粒子群算法对LED植物阵列光源进行寻优设计,由于本实验研究对象为植物,关注的测量指标与传统光学设计不同,因此需进行相关指标的换算推导,再通过光学结构模型和粒子群算法模型阐明该实验的原理。

2.1 实验测量指标

在传统照明领域,常用光度学中的照度来评价光源的出光和照明效果,但由于光度学参量的作用是用于表现人眼对光的响应,其数值受人眼视见函数的影响,而植物的光合敏感曲线与人眼视见函数存在一定差异,因此光度学系统并不适用于植物照明领域^[13-14]。目前的植物照明研究

中常用光量子通量 (Photosynthetic photon flux, PPF) Φ , 即单位时间光源所发射的光子数来评判光照对植物的效果, 其单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 在可见光范围内, 其表达式为

$$\Phi = \int_{380}^{780} \nu(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中 $\nu(\lambda)$ 为光谱光合光子通量, 表示单位波长间隔的光合光子在单位时间内通过单位面积的摩尔数, 单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。考虑 $\Phi_{e,\lambda}$ 与 $\nu(\lambda)$ 的关系为

$$\Phi_{e,\lambda} = \nu(\lambda) n_{\lambda} hc / \lambda, \quad (2)$$

其中 $\Phi_{e,\lambda}$ 为单一波长 λ 的光束的辐通量, n_{λ} 为阿伏加德罗常数 (单位为 μmol^{-1}), 普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 光速 $c = 2.9792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 则 Φ 可表示为

$$\Phi = \int_{380}^{780} \frac{\Phi_{e,\lambda} \lambda}{n_{\lambda} hc} d\lambda, \quad (3)$$

光量子通量密度 (PPFD) $D(\lambda)$ 为单位面积元内的光量子通量, 因此在可见光范围内可得 $D(\lambda)$ 的表达式为

$$D(\lambda) = \int_{380}^{780} \frac{E_{e,\lambda} \lambda}{n_{\lambda} hc} d\lambda, \quad (4)$$

由辐度学和光度学理论, 在可见光范围内, 光学量和辐射量间有如下关系

$$\Phi_v = \int_{380}^{780} K_m \Phi_{e,\lambda} \nu(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

结合公式(4)、(5), 可以得到照度与 $D(\lambda)$ 存在如下关系

$$K = \frac{E_v}{D(\lambda)} = \frac{\Phi_v/A}{\Phi/A} = \frac{\Phi_v}{\Phi} = K_m \cdot n_{\lambda} hc \frac{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot \nu(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda} \cdot \lambda d\lambda}, \quad (6)$$

进一步采用差分离散求和, 并用归一化光谱分布曲线 N_{λ} 代替 $\Phi_{e,\lambda}$, 可得

$$K = \frac{E_v}{D(\lambda)} = \frac{\Phi_v/A}{\Phi/A} = \frac{\Phi_v}{\Phi} = K_m n_{\lambda} hc \frac{\sum_i \nu(\lambda_i) N_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}} = 8.17 \times 10^4 \frac{\sum_i \nu(\lambda_i) N_{\lambda_i}}{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}}, \quad (7)$$

在目标平面上某一点 Q 产生的 $D(\lambda)$ 值, 即 P_Q 为

$$P_Q = \frac{1}{K} \cdot E_v = \frac{1}{8.17 \times 10^4} \cdot \frac{\sum_i \lambda_i N_{\lambda_i}}{\sum_i \nu(\lambda_i) N_{\lambda_i}} \cdot E_v, \quad (8)$$

将 $D(\lambda)$ 在目标平面上的均匀度记为 μ , 则 μ 可以表示为

$$\mu = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N D(\lambda) / (XYN)}{D(\lambda)_{\max}}, \quad (9)$$

由于本文设计所采用的红蓝光 LED 的光谱范围可以通过仪器测得, 因此可准确计算得出照度与 $D(\lambda)$ 间的关系系数 K 值, 这里将 K 记为一常量, 因此均匀度公式可进一步推导如下:

$$\mu = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^Y \sum_{n=1}^N D(\lambda) / (XYN)}{D(\lambda)_{\max}} = \frac{\frac{1}{K} \sum_{x=1}^X \sum_{j=1}^Y \sum_{n=1}^N E_v / (XYN)}{\frac{1}{K} E_v}, \quad (10)$$

由公式(10)可知, 为实现模拟仿真, 提高实验效率, 可选用更易测得的照度均匀度来表征 $D(\lambda)$ 的均匀度。

2.2 光学结构模型

对本文中所选用的 LED 做出如下假设: LED 芯片的发光符合朗伯辐射定律, 并且在传播过程中没有损耗。因此, 其光强 $I(\theta)$ 可以表示为

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta, \quad (11)$$

其中, θ 为光线与光轴夹角, I_0 为轴线上的光强, m 为光源辐射模式, 与半功率角 $\theta_{\frac{1}{2}}$ 处的光照强度有关^[15-16]:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \cos \theta_{\frac{1}{2}}}. \quad (12)$$

如图 1, 在空间点 A(X, Y, Z) 处放置的 LED 芯片在接收平面点 B(x, y, z) 处产生的光照强度可以表示为

$$E(x, y, z) = \frac{(z - Z_i)^{m+1} I_0}{[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2]^{(m+3)/2}}, \quad (13)$$

因此在三维空间中 LED 芯片阵列在接收平面点 B(x, y, z) 处产生的光照强度可以表示为

$$E(x, y, z) =$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{(z - Z_i)^{m+1} I_0}{[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2]^{(m+3)/2}}, \quad (14)$$

将接收平面 T 近似分为 N 点,其中 $N = 10\ 000$,接收平面 T 上的光照强度平均值为

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n E_i, \quad (15)$$

LED 阵列的光照均匀度可以用接收平面 T 上照度的标准差 σ 来衡量, σ 越小说明各点的照度离散程度越小,接收平面上的光照越均匀, σ 的计算公式如下^[16]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E - E_i)^2}{N}}. \quad (16)$$

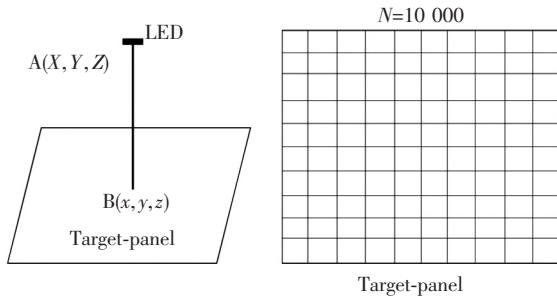


图1 LED 光照模型

Fig.1 LED lighting model

2.3 粒子群算法模型

粒子群算法源于对鸟群捕食行为的研究,常用于解决多目标优化问题,图2给出了粒子群算法进行迭代寻优的主要流程。

如图2所示,粒子群算法实现多目标问题寻优的原理和主要步骤如下^[17-18]:

(a) 初始化种群数量为 N 的粒子,并随机赋予其位置 X_i 和速度 V_i ;

(b) 分别对各个子目标的目标函数值进行计算;

(c) 加入惩罚函数后,计算粒子对目标函数的适应度;

(d) 计算出粒子自身找到的最优解 $pBest$ 和整个种群目前找到的最优解 $gBest$,当前位置的粒子通过对这两个极值进行的追踪,更新自己的速度和位置,采用的公式为

$$V = w * V + c_1 r_1 (pBest - x_{id}) + c_2 r_2 (gBest - x_{id}), \quad (17)$$

$$x_{id} = x_{id} + V, \quad (18)$$

(e) 筛选出的精英解满足函数收敛条件时,输出当前情况下的多目标解集,否则回到步骤(b)。

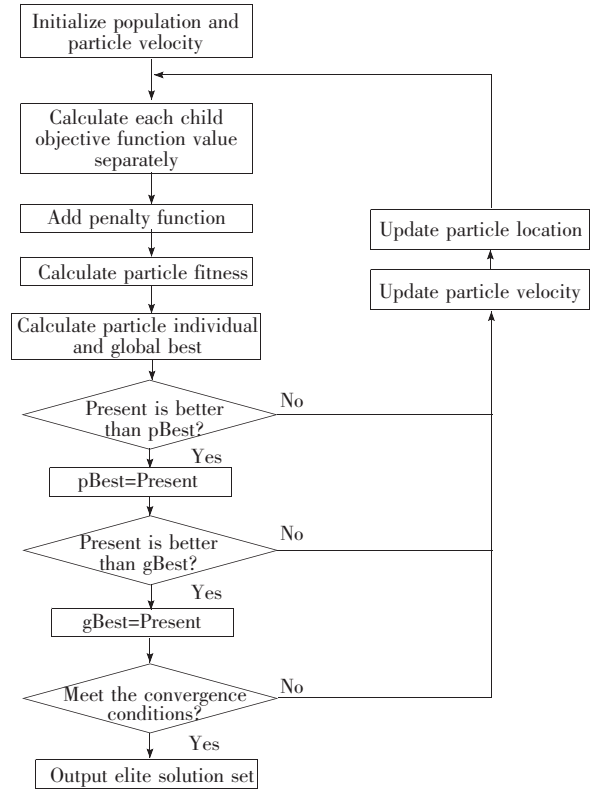


图2 粒子群算法流程图

Fig.2 Flow chart of particle swarm algorithm

本实验基于上述粒子群算法,在 MATLAB 软件上进行编程,分别在二维和三维情况下,对红蓝光 LED 芯片数为 6:3 的 LED 阵列光源进行寻优设计,得出高均匀度条件下的红蓝光 LED 位置坐标。

3 结果与讨论

本实验选用的红蓝光 LED 芯片大小均设定为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$,红光 LED 芯片轴线方向光照强度为 $2\ 400\text{ mcd}$,蓝光 LED 芯片轴线方向光照强度为 $1\ 600\text{ mcd}$,每个发光面的出射光线数均为 $1\ 000$ 条,接收平面 T 置于距原点 $Z = 100\text{ mm}$ 处,将接收平面 T 均匀分为 $10\ 000$ 个点,面向 LED 阵列光源的一面设置为对光线完全吸收。

3.1 对照组 LED 阵列光源

本实验采用常见的逐行排列设计的 LED 阵列光源作为对照组,红蓝光 LED 芯片数为 6:3。

如图3,红光与蓝光 LED 芯片逐行排列是常

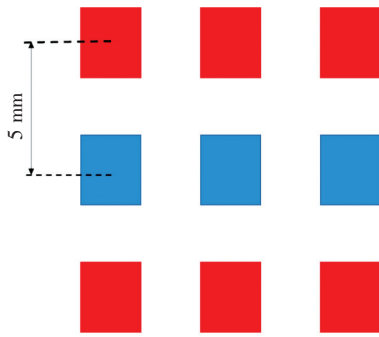


图 3 逐行排列 LED 阵列光源

Fig. 3 Row by line LED array light source

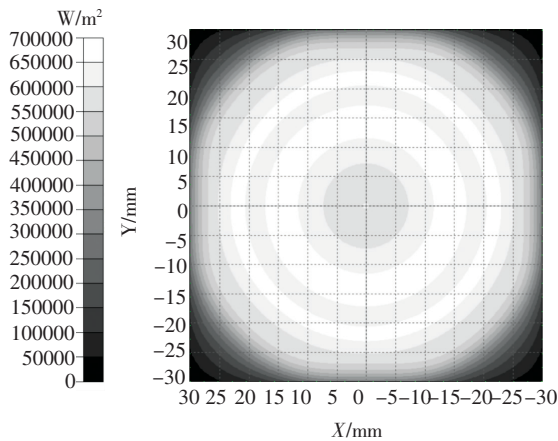


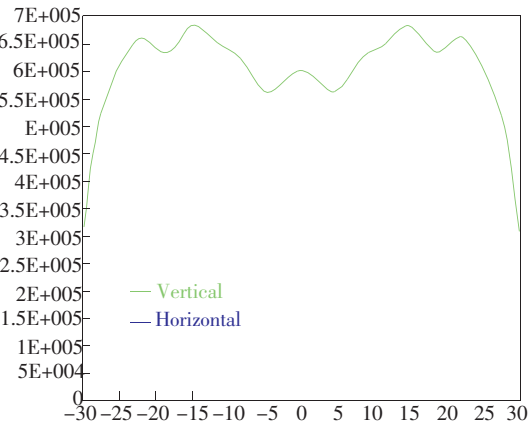
图 4 逐行排列 LED 阵列光源的照度效果图

Fig. 4 Illumination distribution of the row by line LED array light source

见的 LED 植物阵列光源的排布方式,该对照组光源的排布方式参照周国泉等^[19]的设计,在满足标准工作电流的情况下,LED 阵列组合下方 100 mm 处的照明区域满足下列公式

$$S = \left\{ 7L + 2h \tan \left[\frac{13\pi}{180} \right] \right\}^2, \quad (19)$$

本实验取 $L = 5 \text{ mm}$, 计算出距光源 100 mm 处的照明区域约为 64 cm^2 , 而设计接收面板大小为 25 cm^2 , 可以满足照明要求。用 Tracepro 进行仿真实验所得该方案照度效果图见图 4, 计算得出其 PPFD 均匀度为 79.6%。



3.2 由粒子群算法设计的二维 LED 阵列光源

二维红蓝芯片比为 6:3 的 LED 阵列光源,其在接收平面上的光照表达式为:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \frac{z^{m+1} I_0}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{(m+3)/2}} + \sum_{i=1}^N \frac{z^{m+1} I_1}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{(m+3)/2}}, \quad (20)$$

其中 $N = 10\,000$, 表示接收平面被均匀分为 10 000 个点, $z = 100 \text{ mm}$, 即发射平面与接收平面的距离为 100 mm, $I_0 = 2\,400 \text{ mcd}$ 为红光 LED 的光强, $I_1 = 1\,600 \text{ mcd}$ 为蓝光 LED 的光强。将公式(20)设定为二维设计中 PSO 粒子群算法的目标函数,粒子通过迭代不断更新位置和速度,以达到优化目标函数的效果。设定公式(16)为函数收敛条件,经算法寻优后,得到二维情况下 LED 阵列光源的位置坐标如表 1 所示。

表 1 二维 LED 阵列优化坐标参数

Tab1 Optimized coordinates of 2D LED array

LED 芯片	坐标	1	2	3	4	5	6
红光 LED	X	23.387 3	23.387 3	-23.387 3	-23.387 3	0	0
	Y	12.193 6	-12.193 6	-12.193 6	12.193 6	-12.193 6	12.193 6
蓝光 LED	X	0	14.247 5	-14.247 5			
	Y	0	0	0			

对得到的红蓝 LED 坐标进行分析, 根据 Ivan Moreno 提出的 LED 阵列设计方案^[15], 由斯派罗最大平等条件可得出 LED 阵列中发光相同的 LED 的最大距离满足

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+2}}Z, \quad (21)$$

式中, Z 为发光平面中心到接收平面中心的距离, m 在半光强角为 7.5° 时为 73, 计算可得当 $Z = 100$

mm 时 $d_{\max} = 23.4$ mm, 二维设计方案中红光 LED 间距 $d_{\text{red}} = 23.3873$ mm, 蓝光 LED 间距 $d_{\text{blue}} = 14.2475$ mm, 均小于最大间距, 因此符合设计需求。

使用 Tracepro 进行仿真实验得到该方案照度效果见图 5, 并计算得出其 PPFD 均匀度达到 88.7%, 较对照组的 PPFD 均匀度提高了 9.1%, 证明了该设计方法的有效性。

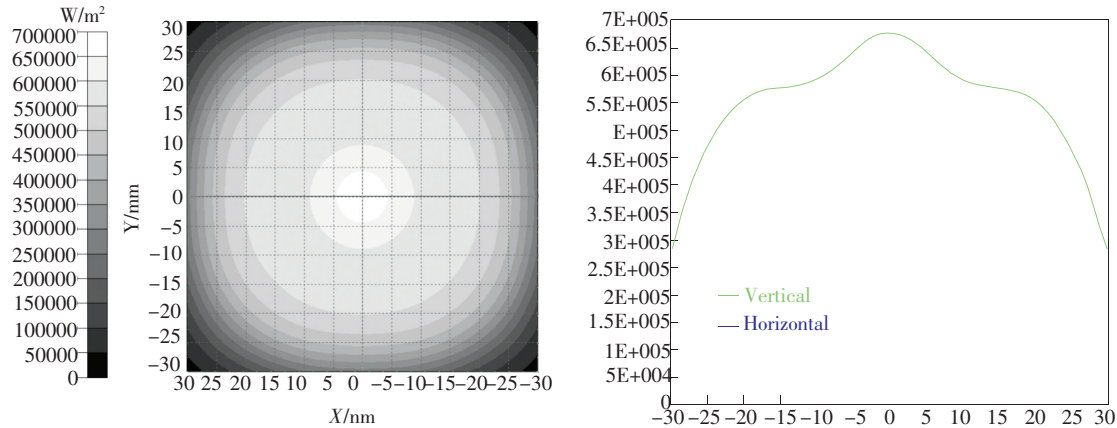


图 5 二维优化后的 LED 阵列照度分布效果图

Fig. 5 Illumination distribution of the optimized 2D LED array

3.3 由改进粒子群算法设计的三维 LED 阵列光源

对于三维红蓝 LED 芯片比为 6:3 的 LED 阵列光源, 其在接收平面上的光照表达式为

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \frac{(z-Z)^{m+1} I_0}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2]^{(m+3)/2}} + \sum_{i=1}^N \frac{(z-Z)^{m+1} I_1}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2]^{(m+3)/2}}, \quad (22)$$

其中 $N = 10\,000$, 表示接收平面被均匀分为 10 000 个点, $z = 100$ mm, 即发射平面与接收平面的距离为 100 mm, $I_0 = 2\,400$ mcd 为红光 LED 的光强, $I_1 = 1\,600$ mcd 为蓝光 LED 的光强。

在三维情况下, 由于维度升高, 求解目标增多, 普通 PSO 算法容易出现陷入局部最小的情况, 影响求解准确度。本文参考张丽萍等^[20]的改进方式, 采用了随机惯性权的粒子群算法对这一缺点加以改进。

定义最优适应度变化率 k 为

$$k = \frac{f(t) - f(t-10)}{f(t-10)}, \quad (23)$$

$f(t)$ 为种群第 i 代时的最优适应值, $f(t-10)$ 为种群第 $i-10$ 代时的最优适应值, 因此 k 表示在进化 10 代内最优适应值的相对变化率, 惯性权系数由公式(24)决定, 且其数学期望随 k 而变:

$$\begin{cases} \omega = \alpha_1 + r/2, & k \geq 0.05 \\ \omega = \alpha_2 + r/2, & k \leq 0.05 \end{cases}, \quad (24)$$

其中 r 为均匀分布在 $[0, 1]$ 的随机数, 由此 ω 的数学期望值将随着最优适应值的相对变化率自适应地调整, 以达到调节局部搜索能力和全局搜索能力的目的。

经改进粒子群算法寻优后, 得到三维情况下红蓝 LED 坐标见表 2。使用 Tracepro 进行仿真实验得到该方案照度效果如图 6, 并计算得出其 PPFD 均匀度达到 92.6%, 较对照组的 PPFD 均匀度提高了 13%, 较二维 LED 阵列光源的 PPFD 均匀度提高了 3.9%, 光照效果进一步得到提高。

表 2 三维 LED 阵列优化坐标参数

Tab.2 Optimized coordinates of 3D LED array

LED 芯片	坐标	1	2	3	4	5	6
红光 LED	X	23.387 3	23.387 3	-23.387 3	-23.387 3	0	0
	Y	12.193 6	-12.193 6	-12.193 6	12.193 6	-12.193 6	12.193 6
	Z	0.138 9	-0.894 1	1.134 7	0.543 8	0.774 5	-1.057
蓝光 LED	X	0	14.247 5	-14.247 5			
	Y	0	0	0			
	Z	2.435 6	2.145 3	1.862 4			

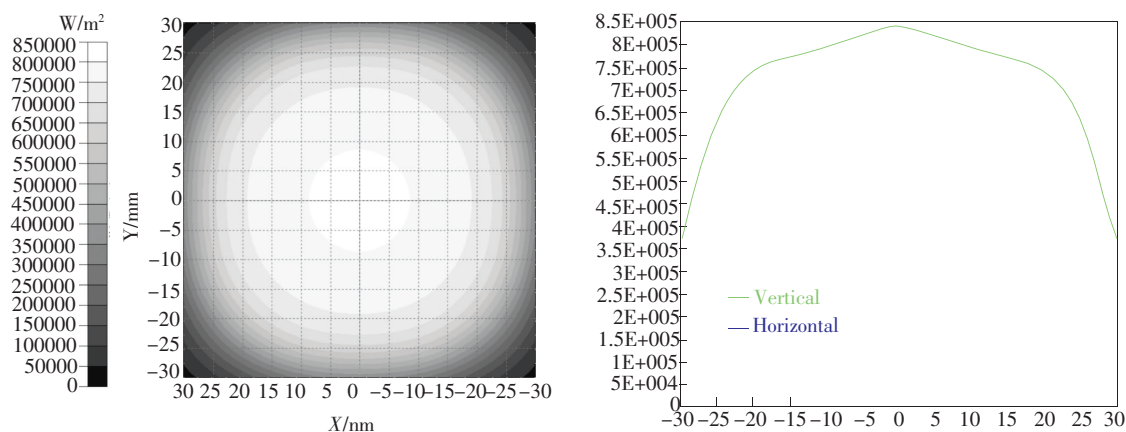


图 6 三维优化后的 LED 阵列照度分布效果图

Fig.6 Illumination distribution of the optimized 3D LED array

4 结 论

为了提高 LED 植物照明阵列光源的均匀度,提高设计效率,本文在光量子体系下,提出了一种基于粒子群算法的 LED 植物照明阵列光源的设计方法,通过 MATLAB 对红蓝光 LED 植物光源阵列进行数学建模,运用粒子群算法寻找高均匀度条件下的红蓝光 LED 坐标,分别设计出二维和三维情况下的两种红蓝光 LED 排布阵列。其中在三维情况下,为解决维度升高时可能会导致的求解陷入局部极小问题,采用改进的随机惯性权粒子群算法进行三维方案设计,使用 Tracepro 对设计方案进行验证,并与传统的红蓝光 LED 逐行排

列设计进行对比。研究表明,与常见逐行排列 LED 阵列设计达到的光量子通量密度均匀度为 79.6% 相比,通过粒子群算法寻优的设计方法,二维设计方案的 PPFD 均匀度达到 88.7%,较逐行排列设计提高了 9.1%;三维设计方案的 PPFD 均匀度达到 92.6%,较二维设计方案提高了 3.9%,较等间距逐行排列设计提高了 13%。本文证明了粒子群算法运用于二维和三维空间 LED 植物照明阵列光源设计的可行性,提供了一种新的设计思路。由于粒子群算法对解决多目标问题的操作简易性,该设计方法可以智能、高效地设计出高均匀度的 LED 植物照明阵列光源,提高了工作效率,节约了大量人力物力。

参 考 文 献:

[1] 刘文科,杨其长. 设施农业照明新光源——发光二极管(LED) [J]. 科技导报, 2014,32(6):12.

LIUW K, YANG Q C. A new light source for facility agriculture lighting—light emitting diode (LED) [J]. *Sci. Technol. Rev.*, 2014,32(6):12. (in Chinese)

- [2] 魏灵玲,杨其长,刘水丽. LED在植物工厂中的研究现状与应用前景[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 408-411.
WEI L L, YANG Q C, LIU S L. Review on research and developing trends of light-emitting diode in plant factory [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2007, 23(11): 408-411. (in Chinese)
- [3] 崔瑾,徐志刚,邱秀茹. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253.
CUI J, XU Z G, DI X R. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture [J]. *Trans. CSAE*, 2008, 24(8): 249-253. (in Chinese)
- [4] 刘晓英,徐志刚,焦学磊,等. 植物照明的研究和应用现状及发展策略[J]. 照明工程学报, 2013, 24(4): 1-7.
LIU X Y, XU Z G, JIAO X L, *et al.*. Progress and development strategy of research and application in irradiation for plant [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2013, 24(4): 1-7. (in Chinese)
- [5] 许巧云. LED植物照明技术及产业状况分析[J]. 光源与照明, 2016(2): 33-35.
XU Q Y. LED lighting technology and analysis of industrial conditions [J]. *Light Sour. Lighting*, 2016(2): 33-35. (in Chinese)
- [6] BOURGET C M. An introduction to light-emitting diodes [J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1944-1946.
- [7] MORROW R C. LED lighting in horticulture [J]. *HortScience*, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [8] 张帅,文尚胜,马丙戌,等. 适用于植物照明的高均匀度LED面光源设计[J]. 发光学报, 2018, 39(3): 403-413.
ZHANG S, WEN S S, MA B X, *et al.*. High uniformity LED panel-light for plant lighting [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018, 39(3): 403-413. (in Chinese)
- [9] 薛洪波,伦淑娴. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 265-269.
XUE H B, LUN S X. A review on application of PSO in multi-objective optimization [J]. *J. Bohai Univ. (Nat. Sci. Ed.)*, 2009, 30(3): 265-269. (in Chinese)
- [10] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. *Proceedings of The 6th International Symposium on MICRO Machine and Human Science, Nagoya, Japan*, 1995: 39-43.
- [11] EBERHART R, SHI Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [C]. *Proceedings of The 2001 Congress on Evolutionary Computation, Seoul, South Korea*, 2001: 81-86.
- [12] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. *Proceedings of ICNN95-International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia*, 1995: 1942-1948.
- [13] 高丹,韩秋漪,张善端. 植物光度学与人眼光度学的量值换算[J]. 照明工程学报, 2015, 26(2): 28-36.
GAO D, HAN Q Y, ZHANG S D. Value conversion between plant photometry and luminous photometry [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2015, 26(2): 28-36. (in Chinese)
- [14] 高鸿磊,诸定昌. 人眼光度学与植物光度学的单位转换[J]. 灯与照明, 2007, 31(2): 34-36.
GAO H L, ZHU D C. The conversion of the units in the photometry for human eyes and plants [J]. *Light Lighting*, 2007, 31(2): 34-36. (in Chinese)
- [15] MORENO I, AVENDAÑO-ALEJO M, TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [16] SU Z P, XUE D L, JI Z C. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm. [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(S6): A843-A845.
- [17] 张利彪,周春光,马铭,等. 基于粒子群算法求解多目标优化问题[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1286-1291.
ZHANG L B, ZHOU C G, MA M, *et al.*. Solutions of multi-objective optimization problems based on particle swarm optimization [J]. *J. Comput. Res. Dev.*, 2004, 41(7): 1286-1291. (in Chinese)
- [18] COELLO C A C, LECHUGAM S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization [C]. *Proceedings of The 2002 Congress on Evolutionary Computation, Honolulu, HI, USA*, 2002: 1051-1056.
- [19] 周国泉,郑军,周益民,等. 温室植物生产用LED组合光源的优化设计[J]. 光电子·激光, 2008, 19(10): 1319-1323.

ZHOU G Q, ZHENG J, ZHOU Y M, *et al.*. Optimal design of LED assembled light source used in the production of greenhouse plant [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2008, 19(10):1319-1323. (in Chinese)

[20] 张丽平, 俞欢军, 陈德钊, 等. 粒子群优化算法的分析与改进 [J]. 信息与控制, 2004, 33(5):513-517.

ZHANG L P, YU H J, CHEN D Z, *et al.*. Analysis and improvement of particle swarm optimization algorithm [J]. *Inf. Control*, 2004, 33(5):513-517. (in Chinese)



唐浩洲(1997 -), 男, 贵州黔南人, 在读本科生, 主要从事 LED 光源的研究。

E-mail: 673388314@qq.com



康丽娟(1977 -), 女, 河南漯河人, 硕士, 副教授, 2003 年于湖北美术学院获得硕士学位, 主要从事光学艺术设计的研究。

E-mail: kanglijuan@scnu.edu.cn



文尚胜(1964 -), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 2001 年于华南师范大学获得博士学位, 主要从事有机及无机半导体材料与器件方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn