

多功能LD与LED混合植物补光装置设计

许珂, 曾丽娜, 刘兆悦, 杨隽锋, 疏轶超, 麦淳铭, 廖芯, 李再金, 乔忠良, 曲轶, 刘国军, 李林*, 徐东昕

海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口

收稿日期: 2022年6月2日; 录用日期: 2022年7月4日; 发布日期: 2022年7月8日

摘要

目前国家正大力推动植物工厂的发展, 光源作为植物工厂中重要的一环, 在植物工厂中起着举足轻重的作用, 目前传统的植物补光灯存在能耗高、性能低、功能单一的缺点, 限制了植物工厂的发展, 降低了植物生长的效率。针对这些问题本文提出了以LD与LED结合的照明模式的植物补光灯, 并增加了紫外消杀、农作物检测、环境参数检测等加载功能, 本文通过粒子群算法优化光源位置, 并结合“L”型滑轨, 降低了植物补光灯的能耗提升了植物补光灯性能和丰富了植物补光灯的功能, 本文通过Trace Pro仿真, 最终得到植物补光灯照度均匀度89.72%, 混色均匀度92.73%, 功率为16 W。

关键词

混合照明, 照明均匀度, 多功能

Design of Multifunctional LD and LED Hybrid Plant Supplementary Light Device

Ke Xu, Lina Zeng, Zhaoyue Liu, Junfeng Yang, Yichao Shu, Chunming Mai, Xin Liao, Zaijin Li, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Guojun Liu, Lin Li*, Dongxin Xu

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Jun. 2nd, 2022; accepted: Jul. 4th, 2022; published: Jul. 8th, 2022

Abstract

At present, the country is vigorously promoting the development of plant factories, but the light source accounts for more than half of the energy consumption of plant factories, which limits the

*通讯作者。

文章引用: 许珂, 曾丽娜, 刘兆悦, 杨隽锋, 疏轶超, 麦淳铭, 廖芯, 李再金, 乔忠良, 曲轶, 刘国军, 李林, 徐东昕. 多功能 LD 与 LED 混合植物补光装置设计[J]. 应用物理, 2022, 12(7): 403-411. DOI: 10.12677/app.2022.127047

development of plant factories. At present, the traditional plant fill light lamp has the disadvantages of high energy consumption, low performance, and single function. In view of these problems, this paper proposes a plant fill the light lamp with the lighting mode of combining LD and LED, and adds the loading functions of ultraviolet disinfection and sterilization, crop detection, environmental parameter detection, etc. This paper optimizes the light source position through particle swarm optimization algorithm and combines the "L" type slide rail, the energy consumption of the plant fill lamp is reduced, the performance of the plant fill lamp is improved and the functions of the plant fill lamp are enriched. Through the trace Pro simulation, the illumination uniformity of the plant fill lamp is 89.72%, the color mixing uniformity is 92.73% and the power is 16 W.

Keywords

Hybrid Lighting, Lighting Uniformity, Multifunction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2013年4月,国家首次将“智能植物工厂”纳入“十二五”863计划。随着国家的支持,近几年植物工厂的发展迅速,目前国内已有200多座人工光型植物工厂[1]。目前人工光型植物工厂中,主要以多层立体式种植为主,如图1所示。这种种植方式相比大棚中的露天种植方式单位面积产量可多达100倍以上。但是目前植物工厂由于各类补光灯标准不统一、功能不齐全无法满足繁杂种类植物的不同生长阶段对光的需求,以及由光源产生的庞大的电力消耗,加大了国内植物工厂的前期成本投入和后期运转成本,让植物工厂的境遇举步维艰。为了进一步推动我国植物工厂的进展,对照明光源的均匀度进行深入研究,探寻植物照明模块效率的最大化十分有必要。



Figure 1. Schematic diagram of step planting in plant factory

图1. 植物工厂阶梯式种植示意图

传统的照明模式仅有LED或者LD作为光源,目前已有学者提出了LD与LED结合的照明模式[2],这种照明模式的优势是可以利用LD的窄脉宽很好地满足植物在某些吸收峰值波段,也可以利用目前LED已经可以覆盖所有可见光波长的优势来满足植物其他光谱吸收波段。但是这种照明模式由于两种光源本身的差异,因此需要对照明均匀度提出新的设计。除此之外,目前植物补光灯还存在活动角度小,功能

不够丰富, 无法很好地满足目前现代化植物工厂中阶梯式的种植形式, 造成了能源的浪费, 降低了植物的生长效率。因此本文提出以 LD 与 LED 作为植物补光装置光源, 并通过粒子群算法提升植物补光装置照明均匀度, 并设计了搭载“L”型滑轨与农作物检测模块、紫外消杀模块、土壤环境参数检测模块等功能模块的植物补光装置, 使得植物可以更好地生长。

2. 植物照明中主要技术指标及其换算关系

植物照明中主要采用有效光合辐射 PAR (photosynthetically active radiation) 计量系统, PAR 辐射是太阳辐射中对植物光合作用有用的辐射能。PAR 计量系统主要分为三种: 光学体系、能量学体系和量子学体系, 三者分别用光照度(lm/W^2)、辐射照度(W/m^2)和光量子通量密度($\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$)来表示[3]。其中光量子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density)为表示 400~700 nm 可见光波长范围内, 光量子在单位时间内通过单位面积上的数目, 后文缩写为 PPFD, 三者之间的转换关系如下所示:

$$E_v = \frac{K_m \int V(\lambda) E_e(\lambda) d\lambda}{\int E_e(\lambda) d\lambda} \cdot E_e \quad (1)$$

$$E_v = \frac{U n_A h c K_m \int V(\lambda) E_e(\lambda) d\lambda}{\int E_e(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

其中, K_m 为常数, 可见光范围内的值约为 683 lm/W , E_v 为光照度, 单位 $\text{lux} = \text{lm/m}^2$, E_e 为辐照度, 单位: W/m^2 , U 为光量子通量密度(PPFD), 单位: $\mu\text{mol/m}^2\cdot\text{s}$ 。 n_A 为阿伏伽德罗常数, h 为普朗克常量, c 为光速。 $V(\lambda)$ 、 $E_e(\lambda)$ 为人眼视见函数。

2.1. 光合量子通量(Photosynthetic Photon Flux)

PPFD 是以植物为对象, 主要指植物在生长过程中所需要的光照强度。而光合量子通量(Photosynthetic Photon Flux)是以光源为对象, 其表征了光源在单位时间内发射、传输、接收的光子数其单位为 $\mu\text{mol/s}$, 这里记作 P , 后文缩写为 PPF。其计算公式为[4]:

$$P = \frac{1}{N_A h c} \int_{\min}^{\max} \varphi_e(\lambda) \cdot \lambda d\lambda \quad (3)$$

其中, $\varphi_e(\lambda)$ 为波长函数图像的绝对辐射光谱。

2.2. 照度均匀度

在植物照明领域中, 照明均匀度主要分为 PPFD 均匀度和混色均匀度[4] [5]。不同于普通照明光源只关注照度和照度均匀性, 植物光源的 PPFD 均匀度和混色均匀度在保证植物生长质量上显得至关重要。如果植物在不同区域的受光种类和受光强度均匀度低, 那么生长的植物品质将会良莠不齐, 使得品质得不到保障。由于 PPFD 均匀度难以直接测量, 因此可以通过测量照度均匀度并通过参数之间的转换关系来表征 PPFD 均匀度, 其表达式如下:

$$\alpha = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N K_{PPFD} / (X \cdot Y \cdot Z)}{K_{PPFD \max}} = \frac{\frac{1}{K_m} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \sum_{n=1}^N E_v / (X \cdot Y \cdot Z)'}{\frac{1}{K_m} E_{v \max}} \quad (4)$$

式中: K_m 为常数, 由式可以看出, 难以测量的 PPFD 均匀度可以由照度均匀度代替, 在下面的实验中, 本文将接收面均匀分为 9 个等面积矩形区域, 取每个区域中心点的照度作为采样点。

2.3. 混色均匀度

混色均匀度定义为样本点 CIE1976 色坐标 u 、 v 的差异，用各个样本点色坐标的均方根值来表示：

$$\Delta u'v' = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M \left[(u'_i - u'_{avg})^2 + (v'_i - v'_{avg})^2 \right]} \quad (5)$$

$$U_{color} = \frac{100}{1 + k_1 \cdot \Delta u'v'_{rms}} [\%] \quad (6)$$

其中， k_1 是一个自定的常数， M 为样本点数目，本文 k_1 取 23.7。

3. 设计方案

3.1. 整体设计框架

该补光系统整体由照明模块、传感器模块、农作物检测模块、反馈模块等组成。整体框架如图 2 所示。整个系统由 PWM 调制电路对照明模块的光强进行任意调制，环境传感器接收到外界环境参数改变到不利于植物生长时，将信号传输给反馈模块，由反馈模块传递给报警模块，提醒用户进行后续处理。农作物检测模块，以植物反射回来的光作为信号，由照明模块将反射回来的光谱信号传递给反射光谱接收模块，方便使用者时时检测农作物病害信息。紫外消杀模块由 4 个 60 mw 波长为 280 nm 的 NCSU 系列紫外(UV-C)光源与组成，其可以有效减少蚜虫、红蜘蛛等病虫的数量与延长蚜虫、红蜘蛛等病虫的发生时间。

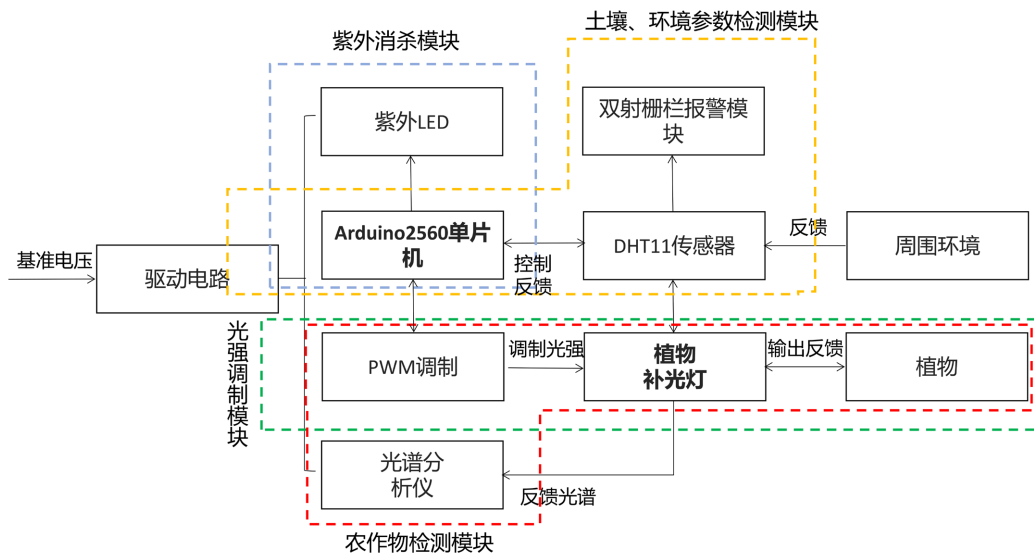


Figure 2. System overall frame
图 2. 系统整体框架

3.2. 补光系统的设计思路

该补光系统的设计思路如图 3 所示，首先确认植物最佳吸收光谱，再确认整个照明系统的辐射照度。并根据得出的辐射照度，确认光源规格，将光源的配光曲线绘制进 Trace Pro 仿真软件。然后将光源与照明模式参数作为初始值代入粒子群算法，通过粒子群算法得出光源的最佳匹配位置，再将光源位置代入 Trace Pro 进行仿真。最后根据实际情况对植物补光装置进行调试。

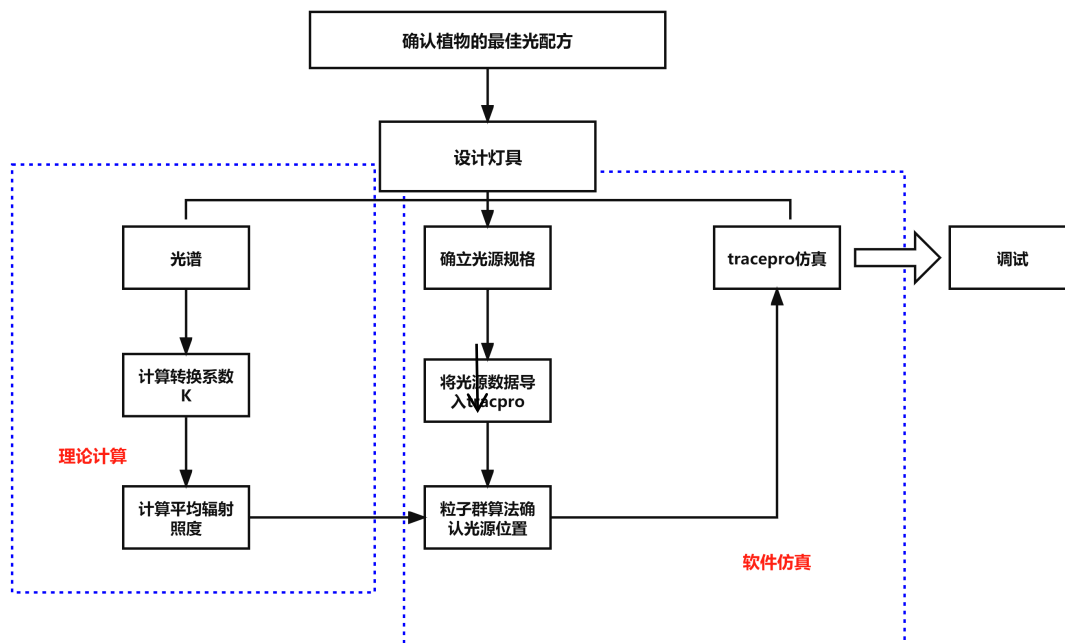


Figure 3. Design idea of fill light system

图 3. 补光系统的设计思路

3.3. 照明结构设计

照明结构设计如图 4 所示，照明结构整体由“L”型滑轨、植物培养架放置台与植物补光灯组成，滑轨与植物补光灯通过旋转齿轮与伸缩杆连接，植物补光灯可以通过控制模块在滑轨上来回移动，增大了植物补光装置的照明角度，减少了植物工厂中植物补光灯的用量。同时植物补光灯左侧装有环境参数传感器，可以将环境参数实时反馈给种植人员，保证植物生长环境良好。其顶部装有反射光谱接收器，通过接收植物反射回来的光谱信号判断植物是否发生病变。红蓝光 LED 呈纵向交叉排列，LED 间距为 1，红光 LD 呈正方形排列，LD 间距为 L。根据植物的吸收光谱，我们选择了鸿利光电型号为 C3535F5R3EA-ZW 中心波长为 660 nm 的 LED，以及鸿利光电型号为 C3535F26B3EA-ZW 中心波长 455 nm 的 LED，和华光光电型号为 HGLD-650TO5-ZGX-1W 中心波长为 660 nm 的 LD，光源功率为 1 W 作为光源。

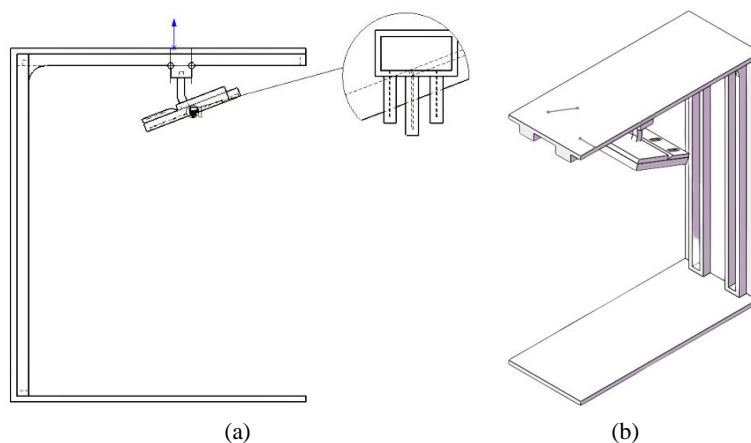


Figure 4. Schematic diagram of lighting device structure (a) left side view of lighting device; (b) front view of lighting device

图 4. 照明装置结构示意图 (a) 照明装置左视图; (b) 照明装置正视图

3.4. 粒子群算法构建与参数设置

粒子群算法也称为粒子群优化算法，粒子群算法是通过个体间的协作与竞争，实现复杂空间中最优解的搜索[6]。在照明均匀度的应用中，我们可以把其看作寻找评价函数最小值的过程。由于 LED 光源与 LD 光源存在自身差异，因此我们需要首先建立 LED 与 LD 的数学辐照度模型，再建立评价函数。

假设 LED 芯片的发光符合兰伯特辐射定律，并且在传播过程中没有能量衰减，发光强度曲线可以用公式(7)粗略表示：

$$I(\theta) = I_0 (\cos \theta)^m \tag{7}$$

其中 θ 是光与光轴之间的角度， I_0 是轴上的光强度， m 是光源辐射模式，与不同垂直高度下发射角($\theta_{1/2}$)的一半的光强度有关。

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln \cos \theta_{1/2}} \tag{8}$$

假设每种灯的数量为 C ，则接收面点 $B(x, y, z)$ 处每种 LED 光源的总光强度如下：

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^C \frac{(z - Z_i)^{m+1} I_0}{\left[(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2 \right]^{m+3/2}} \tag{9}$$

该平面平均分为 N 个点，均匀性可通过目标平面上光强的标准偏差 σ 与平均值 E 的比值来测量：

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \tag{10}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2} \tag{11}$$

激光光源发出的光通常是高斯光。假设光在传播过程中的衰减可以忽略不计，光源模型可以用方程(8)表示：

$$I(x, y) = I_0 \exp \left\{ - \left[\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} \right] \right\} \tag{12}$$

本文中的激光光源发射角小，不能直接用于植物照明。它必须扩散。因此，引入了一个透镜，并将透镜对发光角 θ 的膨胀系数设置为 τ 。光源照明模型参考图 4，那么在空间中，放置在点 $A(x, y, z)$ 的激光光源被透镜散射后，并假设激光光源的数量为 C ，在接收平面点 $B(x, y, z)$ 产生的辐照度可以表示为：

$$E(x, y, z) = \frac{D\pi}{\tau^2 (z - Z)^2} K_\lambda \sum_{i=1}^N \exp \left\{ - \left[(x - X_i)^2 / 2\tau^2 + (y - Y_i)^2 / 2\tau^2 \right] \right\} \tag{13}$$

参照式(10)(11)，可得到激光总辐照度 σ 和的 \bar{E} 标准偏差表达式。

本文将照明平面和发光平面固定，采用二维粒子群算法对照明系统进行优化。因此， $(z-Z)$ 是一个固定值，每个灯珠只需要 (X, Y) 。因此，评价总体均匀性评价函数 σ_{eca} 可以用以下公式表示：

$$\sigma = \bar{E} f(X_1, Y_1; X_2, Y_2; \dots; X_N, Y_N) \tag{14}$$

σ 为均匀度的标准差，光照平面上的标准差较为全面地反映出整个平面的光照均匀性， σ 越小，说明离散程度越小，光照平面上的光照度均匀性越高。

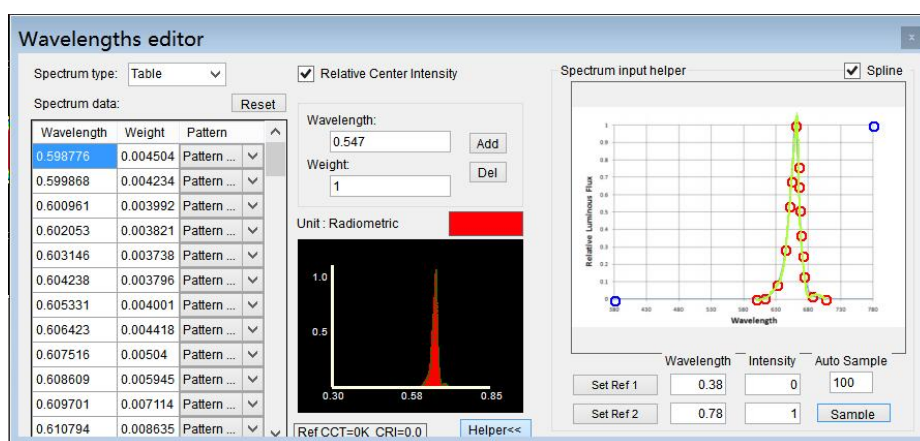
粒子群算法在 matlab 仿真软件下进行优化计算，粒子群算法初始参数设置如表 1 所示。经过优化，LED 间距为 15 mm，LD 间距为 10 mm。

Table 1. Initial parameter settings of particle swarm optimization algorithm**表 1.** 粒子群算法初始参数设置

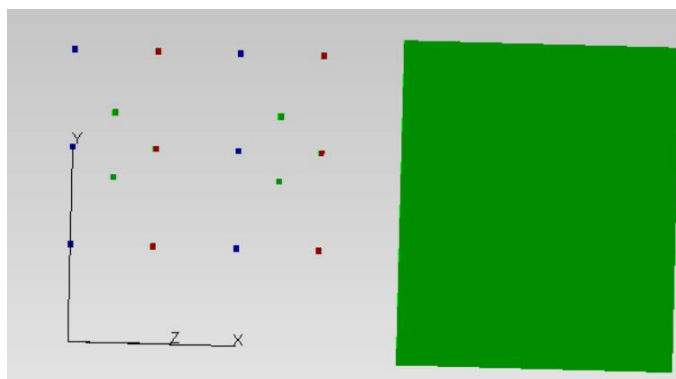
参数	最大迭代次数	种群大小	权重因子	光源照射距离
参数值	100	16	0.5	300 mm

4. Trace Pro 模型仿真

我们以切花菊的花期为例，其花期需要的 PPFD 值为 $400 \text{ umol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$ ，光质比为红:蓝 = 2:1 则换算为辐射照度 $E_e = 178.2 \text{ W/m}^2$ ，其中红光为 $E_{er} = 125.1 \text{ W/m}^2$ ，蓝光为 $E_{eb} = 53.1 \text{ W/m}^2$ 。因此我们选择 8 个红光 LED，与 4 个红光 LD 和 4 个蓝光 LED 作为植物补光设备光源，因此补光设备功率为 16 W，同时我们将光源数据代入 Trace Pro 仿真软件，为了更加符合植物生长所需要的光谱曲线，我们通过 Trace Pro 对光谱曲线进行拟合，如图 5 所示。

**Figure 5.** Light distribution curve of light source**图 5.** 光源配光曲线

在 Trace Pro 仿真软件中对混合阵列进行光照模拟，按照上文建立的灯具底板以及通过粒子群算法仿真出来的 LED 与 LD 间隔，根据选用的红光 LD 与蓝光 LED 和红光 LED 的参数进行表面光源设计，接受面的属性设置为“Perfect Absorber”，可以完全吸收入射光，方便进行光照效果分析，混合照明仿真示意图如图 6 所示。

**Figure 6.** Mixed lighting simulation diagram**图 6.** 混合照明仿真示意图

完成光线追踪后,对接收面进行辐射照度与色度的分析,获得接收面辐射照度与色度分析分布示意图如图7所示。

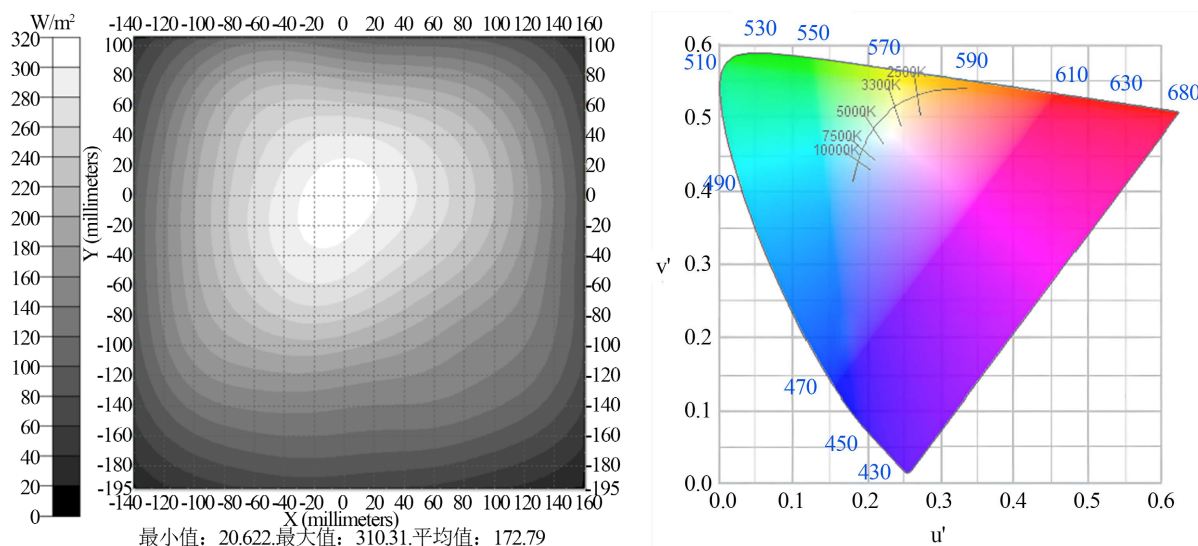


Figure 7. Irradiance analysis diagram and U-V coordinate chromaticity analysis diagram (from left to right)

图7. 辐射照度分析与u-v坐标色度分析图(从左到右)

通过辐射照度分析图下方的数据记录可以看到平均辐射照度在 $172.79 W/m^2$, 与计算误差相距为 3% 左右。同时我们将辐射照度分析图与 u-v 坐标色度分析图均匀划分为 9 个区域, 代入公式(4) (5) (6), 求出照度均匀度为 89.72%, 混色均匀度为 92.73%。根据《植物光照用 LED 灯具通用技术规范》[7], 本文的照明均匀度远高于标准中的照度均匀度 80% 以上, 混色均匀度 75% 以上, 可以很好地满足植物的生长。

5. 应用前景与展望

目前植物工厂受到光源能耗过大的影响, 发展受到限制, 市场急需一款低耗能、高性能、多功能的植物补光设备, 本文的多功能植物补光设备解决了以往植物补光灯能耗高、性能低、功能单一的缺点, 并为后续植物补光装置的研发提供了新的思路。该植物补光装置可以广泛应用到植物工厂、种植大棚、家庭种植等场景。除此之外, 植物工厂与其内部的补光设备代表着未来农业的发展方向, 集高技术、高投入、高产出于一体, 更加集成化、产业化、智能化、网络化、多功能化, 是解决当下食品安全、环境污染、土地资源紧张、劳动力成本上升的有效途径。

基金项目

海南省自然科学基金(2019RC192, 2019RC190, 120MS031), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省科技项目(ZDYF2020217, 622RC671, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 大学生创新训练项目(202111658013)、大学生创新创业开放基金(202111658021X, 202111658022X, 202111658023X)和海南省院士创新平台科研专项资金(YSPTZX202127)资助。

参考文献

- [1] Tennessen, D.J., Bula, R.J. and Sharkey, T.D. (1995) Efficiency of Photosynthesis in Continuous and Pulsed Light Emitting Diode Irradiation. *Photosynthesis Research*, **44**, 261-269. <https://doi.org/10.1007/BF00048599>

-
- [2] Huang, Y. and Ma, J. (2020) Laser and LED Hybrid Plant Lighting System Design Based on the Particle Swarm Algorithm. *Applied Sciences*, **10**, Article 7588. <https://doi.org/10.3390/app10217588>
- [3] 陈颖聪, 文尚胜, 罗婉霞, 陈津桥, 谢嘉宁. 自由曲面底板的 LED 光学设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2947-2953.
- [4] 姜昕宇, 文尚胜, 左欣, 马丙戌, 靳肖林, 蔡明兴, 陈妍如, 焦飞宇, 张博, 吴启保. 具有凸台结构的高照明均匀度倒置型植物光源设计[J]. 发光学报, 2020, 41(3): 339-349. <https://doi.org/10.3788/fgxb20204103.0339>
- [5] 张博, 文尚胜, 马丙戌, 焦飞宇, 姜昕宇, 卢允乐, 黄玮钊, 吴启保. 双光源模块高空间照明均匀度植物光源的设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S1): 194-208.
- [6] Tao, M., Huang, S.Q., Li, Y., Yan, M. and Zhou, Y.Y. (2015) SA-PSO Based Optimizing Reader Deployment in Large-Scale RFID Systems. *Journal of Network and Computer Applications*, **52**, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.02.011>
- [7] 张志平, 肖正谊, 倪济宇, 王钢生. LED 植物照明灯具标准法规/技术规范分析综述[J]. 日用电器, 2019(11): 31-35+40.