

LED 植物灯高均匀性照明鳞甲透镜设计

赖丽萍^{1*}, 庄其仁²¹厦门工学院计算机科学与信息工程学院, 福建 厦门 361021;²华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 针对现有植物灯照度均匀性不高和效率低下的问题,本团队设计了一种 LED 鳞甲透镜植物灯。首先研究了红光和蓝光 LED 的配比和排列方法,采用 9 点法进行光谱测量,研究了光谱分布的均匀性;然后根据光学原理和非成像光学原理设计了一款鳞甲透镜,利用鳞甲透镜的鳞甲弧度将 LED 发出的光线均匀化,增加光线的耦合程度,进而提高出光面的光学效率和均匀性;最后将 14 颗 1 W 三星 3535 蓝光 LED 灯珠(型号为 LH351H 450 nm L4A4B)和 70 颗 1.6 W 三星 3535 红光 LED 灯珠(型号为 LH351H 660 nm V2 E7W410)作为植物灯光源,在尺寸为 380 mm×220 mm 的植物灯中均分为 7 行,每行 12 颗 LED,通过 TracePro 软件进行仿真实验。仿真结果表明,当红光与蓝光光子数比 8:1 时,红光 LED 和蓝光 LED 均匀排列方式的光谱均匀性优于蓝光 LED 均分两列排列方式的光谱均匀性。最后制作 LED 植物灯,整灯测试结果表明,当鳞甲透镜长为 22 mm,宽度为 16 mm,最大高度为 6.68 mm,内表面的底面直径为 6.26 mm,内表面高为 2.98 mm,鳞甲凸起高度为 0.1 mm,鳞甲宽度为 0.35 mm,两个 LED 中心列间距为 25 mm 时,植物灯的光束角为 90°,接收面距植物灯出光面 0.5 m,在 500 mm×500 mm 的照明区域上可以得到光量子通量密度(PPFD)均匀性为 93.12%、光学效率为 90%的植物照明面光源。

关键词 光学器件; LED 植物灯; 鳞甲透镜; 光谱均匀性; 光量子通量密度均匀性; 光学效率

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1805001

1 引言

随着 LED 应用产业的不断发展,LED 灯正逐步替代传统光源作为植物组培应用光源。目前,业界关于植物照明方面的研究主要侧重于光谱能量分布对植物生长的影响,而关于 LED 植物灯照明效果对植物影响的深层机理较少有人研究^[1-3]。单个 LED 的功率较小,且具有较高的指向性,必须经过合理的阵列设计才能实现光在照射范围内的均匀性,确保植物能得到均匀的光照,减小光源带来的误差和影响^[4-6]。实现均匀照明的方式主要有调整植物灯 LED 光源阵列的排列方式或添加光学元件^[7-9],虽然这些方法可以实现光源在出光面上的均匀性,但光利用率不高,而且关于光谱均匀性的研究报道较少。方深等^[10]对 LED 组培灯灯珠的位置进行设计,并对比了两根灯管和三根灯管的照明效果,后者的光照均匀性为 85%;陈浩伟等^[11]设计了一种自由曲面底板的 LED 植物组培灯,其光量子通量密度(PPFD)均匀性约为 80%;靳肖林等^[12]通过对 LED 植物光源加装多根灯管和光纤透镜的方式实现了 PPFD 均匀性为 90%,但其结构复杂,且有效光能利用率也只有 43%;张帅等^[13]设计了一种拼接结构

为六边形的棱锥状混光元件,该元件可使 300 mm×180 mm 接收面上的照度均匀度为 90.63%,但光学效率仅为 46.9%,而且拼接方式易导致靠近边缘位置的照度衰减明显,从而降低照度均匀度;焦飞宇等^[14]提出了菱形底面悬吊光源结构的立体化光源系统设计方案,该方案可使设计空间内的水平面照度均匀度为 92%,竖直面照度均匀度为 83.12%,但悬吊光源结构的制作工艺相对繁琐。目前,大多数提高 LED 植物灯均匀性照明的方法局限于改进 LED 的排列方式、对 LED 光源板结构进行设计、外加扩散板等,这些方法不能较好地提高 LED 植物灯的照明均匀性,而且光学效率也较低^[15]。许冰聪等^[16]对汽车的反光杯进行结构改良,设计了一种棱状反光杯,该反光杯可使中央光斑进一步集中,视觉效果也更加柔和,照度基本上比较均匀;韩敏等^[17]设计的双层 TIR 透镜在出射面的正中间加上了复眼结构,能够实现 85% 以上的光学效率,光斑均匀,无明显的黄斑现象。以上两种结构对于提高 LED 灯的均匀照明具有一定的参考价值,但其光学效率相对较低。

针对现有的 LED 植物光源在植物培育中光照不均匀的问题,本团队对目前植物工厂中使用较为广泛的

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2022-01-04; 录用日期: 2022-01-25

基金项目: 2019 年度福建省中青年骨干教师教育科研项目(JAT190943)

通信作者: *lplai78@163.com

红、蓝 LED 阵列型光源进行优化设计,通过对比两种不同 LED 阵列排布方式下的光谱,选择均一性较好的光谱,实现了光谱的均匀性;然后设计鳞甲透镜,利用鳞甲透镜的鳞甲弧度使 LED 发出的光进一步均匀,增加光线的耦合程度,从而提高出光面的光学效率和均匀性,以期对实际应用中的大面积植物均匀照明提供参考。

2 设计原理

LED 植物照明鳞甲透镜结构如图 1 所示,该结构包含两个曲面——鳞甲曲面和自由曲面,LED 光源在

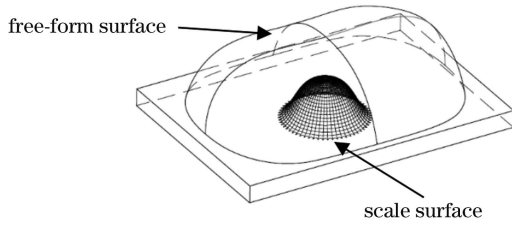


图 1 鳞甲透镜的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of scale lens

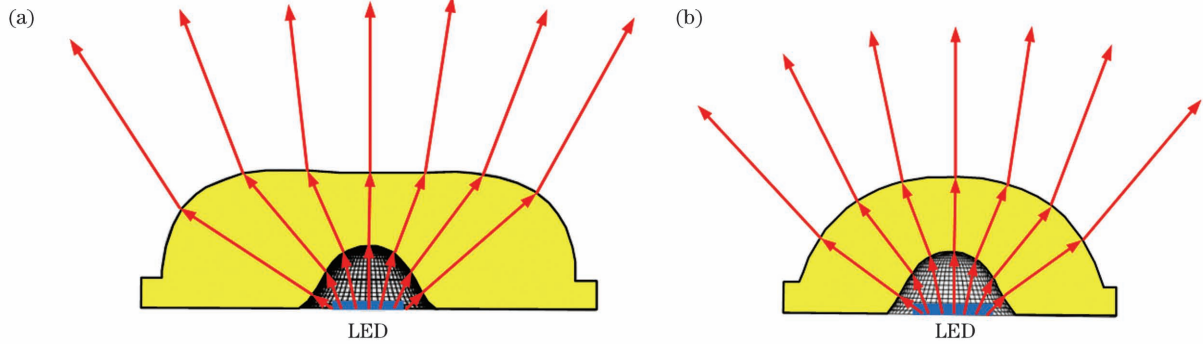


图 2 鳞甲透镜的横向和纵向剖面光路图。(a)横向剖面光路图;(b)纵向剖面光路图

Fig. 2 Light path diagrams of transverse and longitudinal sections of scale lens. (a) Light path diagram of transverse section; (b) light path diagram of longitudinal section

在光量子学中,与光度学的照度相对应,用来表征植物灯照明效果的参数是 PPF,即受照面单位时间内单位面积上所接收到的光子数目,单位是 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;而与光通量对应的则是光量子通量(PPF),它表示单位时间内光源发射出的光子数目,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在植物学领域,光合有效辐照度 E_{PRA} 可以表示为

$$E_{\text{PRA}} = \int_{380}^{780} E_e(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中: $E_e(\lambda)$ 表示辐照度; λ 表示波长。

根据光子理论,光子能量的表达式为

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: h 表示普朗克常量; c 表示光速。由式(3)、式(4)可以得到照度与 PPF 之间的换算公式。因为光子数量级过大,所以采用摩尔单位计数,可得 PPF 的计算公式为

$$P_{\text{fd}} = \int_{380}^{780} \frac{E_e(\lambda) \cdot \lambda}{N_A hc} d\lambda, \quad (5)$$

式中: P_{fd} 代表 PPF; N_A 表示阿伏加德罗常数。

鳞甲透镜的下方。LED 光源发出的光首先在鳞甲曲面的作用下进行一次均匀分配,鳞甲弧度的精准设计可使 LED 光源发出的发散光线均匀高效地入射到自由曲面;然后根据非成像光学原理,进行自由曲面设计,将经过自由曲面的 LED 光线与接收面联系起来,将光线均匀地分配到接收面上。

LED 光源下表面与鳞甲透镜的下表面齐平。LED 光源的发光角度约为 120° ,其光线分布呈朗伯体形式,光强分布为

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

式中: I_0 表示光源在法线方向的发光强度; θ 表示入射光线与 z 轴的夹角。光强与辐照度的关系^[15]为

$$E_e = I \cos \theta. \quad (2)$$

当 $\theta = 0^\circ$ 时,光强 I 与辐照度 E_e 相等,此时可以通过光强值得到辐照度的值。只要有光场存在,空间各点的光强即有确定值,而辐照度则由被照面的方位决定。LED 发出的光经过鳞甲透镜后的横向和纵向剖面光路图如图 2 所示。

由式(5)可知,PPFD 均匀度可由直接测量的辐照度进行转化得到。因此,本文的鳞甲透镜依据照度均匀进行设计。

2.1 自由曲面设计原理

LED 光源发出的总光通量 Φ 为

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\theta_{\text{max}}} I(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (6)$$

式中: θ_{max} 表示光源的出射光与 z 轴之间的最大夹角。在 YOZ 平面上,将 θ_{max} 均分为 A 等份,每份出射角度为 $\Delta\theta$,如图 3 所示,则在接收平面上会形成一个长和宽都是 L 的方形照明区域。从光源发出的光线照射到接收面上。对照明接收面进行分割,将方形接收面划分成 M 个小方块。对于 LED 发光光源,极角在 θ_i 到 θ_{i+1} 区间的所有光线都被限制在相应的方块区域。在光源与接收面之间建立一一对应关系,确保一定比例的光源能量可以分布在相同比例面积的接收面方块内,从而实现接收面上的照度均匀性。 I_0 是沿 z 轴方向的光强,接收面的均匀照度为 E ,根据能量守恒可以得到接收面上总能量的表达式为

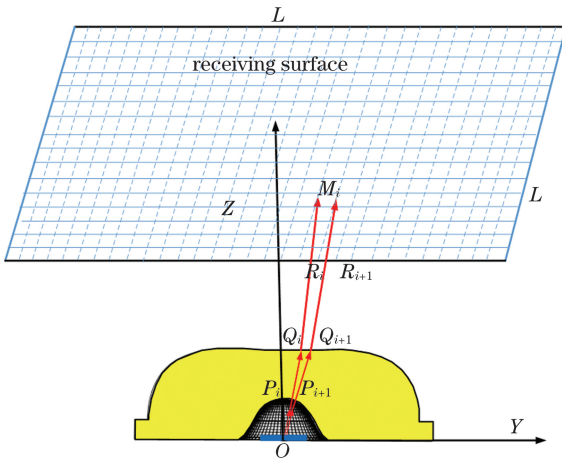


图 3 鳞甲透镜均匀照明原理

Fig. 3 Uniform illumination principle of scale lens

$$\varphi = E \cdot S = \int_0^{\theta_{\max}} I(\theta) \cdot \sin \theta d\theta, \quad (7)$$

式中: S 表示接收面照明总面积, 可以用 L^2 表示。每个方块接收的能量为

$$E \cdot \frac{L^2}{M} = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I_0 \cdot \sin \theta \cos \theta d\theta. \quad (8)$$

图 2 所示的鳞甲透镜自由曲面以及鳞甲曲面的横向和纵向剖面曲线可以看成是由一系列离散点通过曲

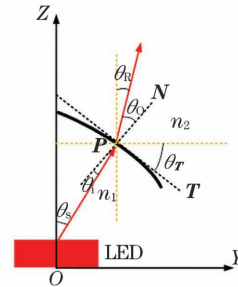
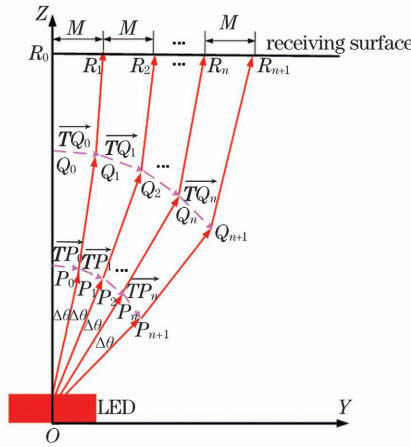


图 4 自由曲面设计原理图。(a)自由曲面折射图;(b)P 点折射图

Fig. 4 Design principle of free-form surface. (a)Refraction diagram of free-form surface;(b) refraction diagram of P-point

根据 Snell 定律可得 θ_i 和 θ_o 的关系为

$$n_2 \sin \theta_o = n_1 \sin \theta_i. \quad (11)$$

联立式(9)~(11), 可以得到 P 点处切向矢量 T 的斜率角 θ_T 为

$$\theta_T = \arctan\left(\frac{n_2 \sin \theta_R - n_1 \sin \theta_s}{n_2 \cos \theta_R - n_1 \cos \theta_s}\right). \quad (12)$$

点 P 处的切向矢量 T 可以表示为

$$T = [1 \quad \tan(\theta_T)]^T. \quad (13)$$

切向矢量可通过式(13)来求得, 所以可求解自由曲面上任意点的坐标。

2.2 鳞甲结构设计原理

将 LED 光源发出的光线按角度分为 A 等份, 每

线拟合得到的, 因此, 当光源与接收面的能量映射关系确立后, 就可以对自由曲面和鳞甲曲面的曲线进行离散化。构造的鳞甲透镜自由曲面和鳞甲曲面如图 4(a)所示, 其中 $OP_0, OP_1, \dots, OP_n, OP_{n+1}$ 分别表示从光源 O 点发出的入射光线, $P_0Q_0, P_1Q_1, \dots, P_nQ_n, P_{n+1}Q_{n+1}$ 表示经过鳞甲曲面的折射光线, $Q_0R_0, Q_1R_1, \dots, Q_nR_n, Q_{n+1}R_{n+1}$ 表示经过自由曲面的折射光线, $\overrightarrow{TP_0}, \overrightarrow{TP_1}, \overrightarrow{TP_2}, \dots, \overrightarrow{TP_n}$ 和 $\overrightarrow{TQ_0}, \overrightarrow{TQ_1}, \overrightarrow{TQ_2}, \dots, \overrightarrow{TQ_n}$ 表示离散点法线的切向向量。上述光线和切向向量用于构造二维轮廓曲线。通过计算自由曲面和鳞甲曲面离散点的切线矢量可以得到鳞甲透镜的曲线。如图 4(b)所示, 折射点 P 处的切线矢量为 T , 从 O 点发出的光线入射到自由曲面上的点 P 。根据 Snell 折射定律, 可以得到

$$\theta_o = \theta_r - \theta_R, \quad (9)$$

$$\theta_i = \theta_T - \theta_s, \quad (10)$$

式中: θ_o 是入射光线经过点 P 后的折射角; θ_r 是点 P 切向矢量 T 的斜率角; θ_R 是光线经过折射面后的方位角; θ_s 是从光源 O 处发出的光线的方位角; θ_i 为光线在点 P 处的入射角。 n_1 为入射光线所在介质的折射率, n_2 为出射光线所在介质的折射率, N 为点 P 的法向量。

一等份对应的光线通过等间距划分的鳞甲透镜的一片鳞甲, 鳞甲宽度为 a 。根据朗伯型光源模型, 可得鳞甲透镜上每一片鳞甲的光强度为

$$I_m = I_0 \cos\left(\frac{n\pi}{2A}\right). \quad (14)$$

图 5 所示为鳞甲透镜的鳞甲结构图。鳞甲有向内凹陷和向外凸出两种形式, 本文主要探究鳞甲结构的“凹凸”方式对植物灯均匀性的影响。设定鳞甲结构尺寸如下: 鳞甲凸起高度为 0.1 mm, 鳞甲宽度为 0.35 mm。本文将在第 3 节详细分析鳞甲不同的凸起高度和宽度对植物灯光学效率和均匀性的影响。

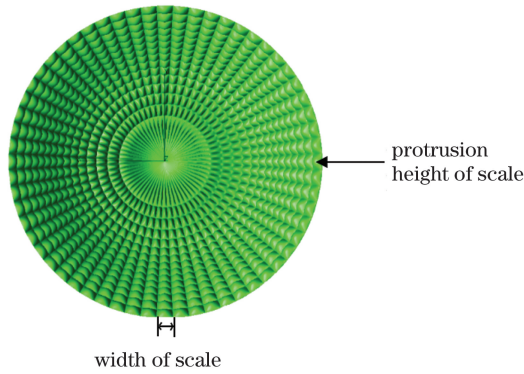


图 5 鳞甲结构设计

Fig. 5 Design of scale structure

3 仿真结果及分析讨论

本文设计的植物灯共有 84 颗 LED, 包括 14 颗 LH351H 450 nm L4A4B 蓝光 LED 和 70 颗 LH351H 660 nm V2E7W410 红光 LED, 其中: 蓝光 LED 的功

率为 1 W, 发光角度为 120°, 灯珠封装尺寸为 3.5 mm×3.5 mm; 红光 LED 的功率为 1.6 W, 发光角度为 120°, 灯珠封装尺寸为 3.5 mm×3.5 mm。红光和蓝光 LED 的光谱图如图 6 所示。在尺寸为 80 mm×220 mm 的植物灯中, LED 光源均分为 7 行, 每行 12 颗 LED。设计的鳞甲透镜的材料选用聚碳酸酯(简称“PC”), 该材料的折射率为 1.59, 鳞甲透镜的长度(鳞甲透镜截面的最大直径)为 22.0 mm, 宽度为 16 mm, 高度为 13.5 mm, 透镜内表面的底面直径为 6.7 mm, 高为 4.5 mm, 鳞甲凸起高度为 0.5 mm。将设计好的模型导入 TracePro 软件中, 将 3535 规格的 LED 光源模型上表面正中心定为坐标中心点(0,0,0), z 轴正方向为 LED 发光方向; 接收面的位置先建立在(0,0,500)处, 即与 LED 植物灯出射面相距 50 cm 处; 接收板尺寸为 500 mm×500 mm。设置好各个参数, 对系统进行光线追迹仿真。

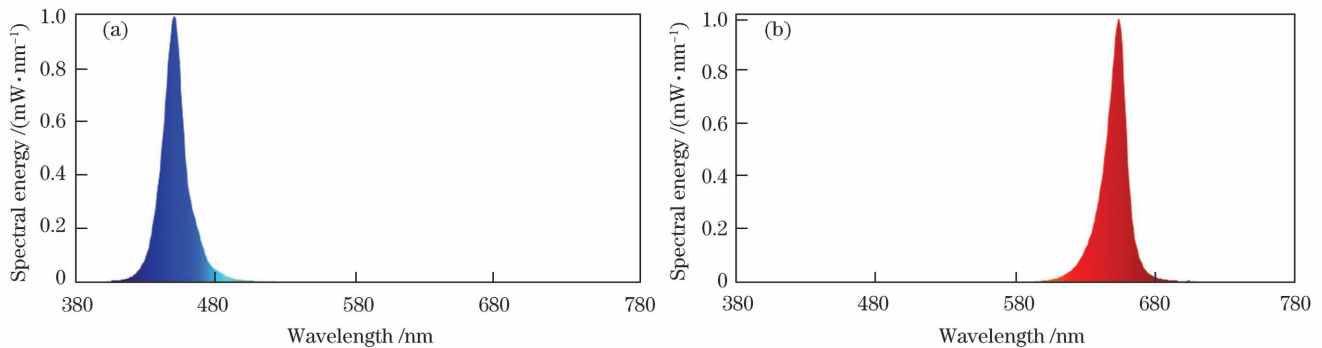


图 6 红光和蓝光 LED 的光谱。(a) 蓝光 LED 的光谱; (b) 红光 LED 的光谱

Fig. 6 Spectra of red and blue LEDs. (a) Spectrum of blue LED; (b) spectrum of red LED

3.1 LED 光源配光

首先对红光和蓝光 LED 光源进行排列, 两种排列方式如图 7 所示。第一种排列方式如图 7(a) 所示, 14 颗蓝光 LED 平均分为两列, 在 12 列位置中选取两列进行放置, 本次实验随机放在第 4 列和第 9 列位置处; 第二种排列方式如图 7(b) 所示, 蓝光 LED 和红光 LED 的数量之比为 1:5, 即, 平均 5 颗红光 LED 配 1 颗蓝光 LED, 因此, 将红光和蓝光 LED 按 5:1 的比例

排列方式均匀地放置在光源板上。在两种不同的 LED 阵列排布方式下进行仿真, 采用 9 点法进行光谱的测量, 观察光谱分布的均匀性。

采用 9 点法进行光谱测量, 观察光谱分布的均匀性。图 8(a) 为蓝光均分两列排列方式下的光谱图, 图 8(b) 为红光和蓝光 LED 均匀排列方式下的光谱图。通过对比两个光谱图可以发现: 当蓝光均分两列排列时, 在波长为 450 nm 的蓝光区域, 光谱差异较

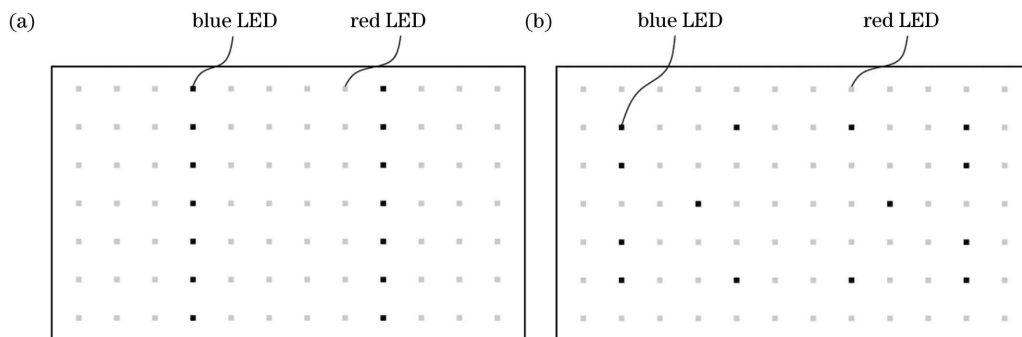


图 7 LED 光源的两种排列方式。(a) 蓝光 LED 均分两列排列; (b) 红光和蓝光 LED 均匀排列

Fig. 7 LED light sources are arranged in two ways. (a) Blue LEDs are equally arranged in two columns; (b) red and blue LEDs are evenly arranged

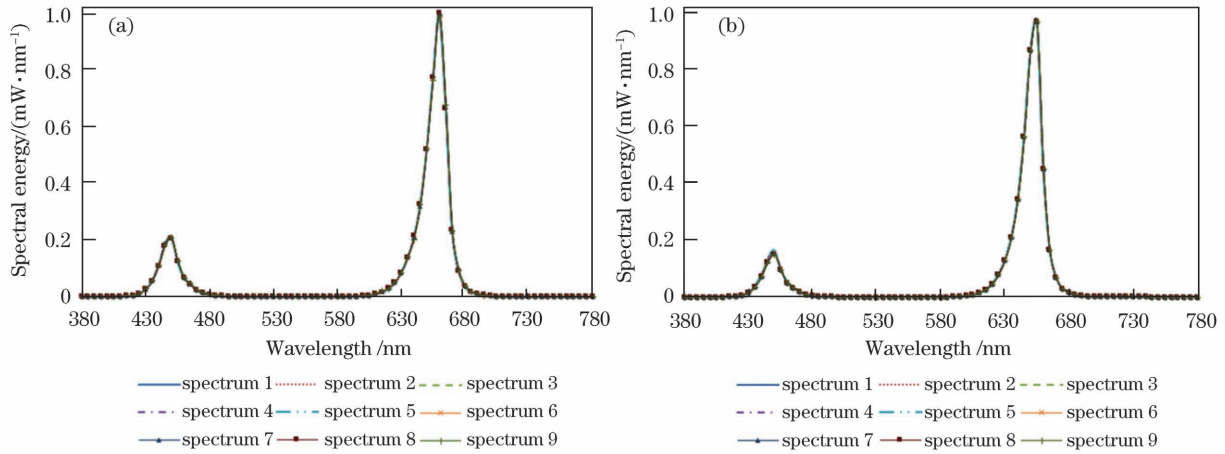


图 8 LED 光源在两种排列方式下的光谱图。(a)蓝光 LED 均分两列排列;(b)红光和蓝光 LED 均匀排列
Fig. 8 Spectra of LED light sources in two arrangement modes. (a) Uniform arrangement in two columns of blue LEDs;
(b) uniform arrangement of red and blue LEDs

大,光谱的均一性不好;当红光和蓝光 LED 均匀排列时,9 点的光谱均一性较好。由此可得到如下结论:红光和蓝光 LED 均匀排列的方式有利于提高光源阵列光谱的均一性。因此,本文选用红光和蓝光 LED 均匀排列的方式进行设计。

最终 LED 植物灯的光源为朗伯光源,配光曲线如

图 9(a) 所示,发光角度为 120° ,对应的 PPFD 分布如图 9(b) 所示。将接收面分成 25×25 个测试点,得到接收面的最小 PPFD 为 $240.5 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,平均 PPFD 为 $385.85 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。PPFD 均匀性用 U_0 表示, U_0 为接收面上的最小 PPFD 值与 PPFD 均值之比^[18-19]。计算得到 LED 植物灯光源的 PPFD 均匀性为 62.33%。

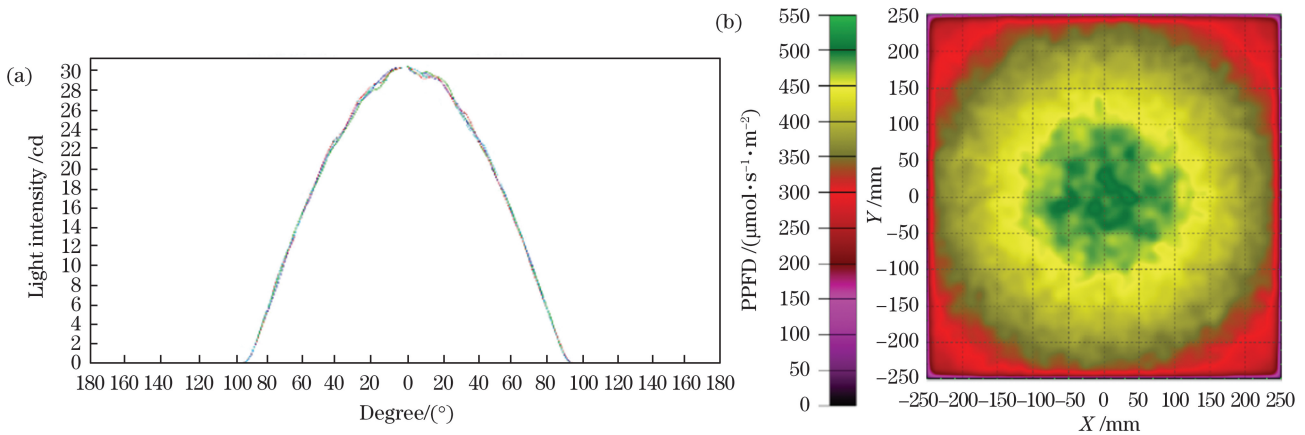


图 9 LED 植物灯光源的配光曲线和 PPFD 图。(a)配光曲线;(b)PPFD 图

Fig. 9 Light distribution curve and PPFD diagram of LED plant lamp. (a)Light distribution curve; (b)PPFD diagram

3.2 鳞甲凸起高度 H 对植物灯接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响

鳞甲凹凸方式对植物灯接收面 PPFD 均匀性和光学效率有影响;当鳞甲结构向内凹陷时,光发散,易使光线反射,导致接收板的光学效率较低;当鳞甲结构向外凸出时,通过调整弧度可以提高光学效率并实现较好的 PPFD 均匀性。鉴于此,本文采用鳞甲结构向外凸出的设计。当鳞甲结构凸起高度 H 为 0.1 mm 时,如图 10 所示,接收面的 PPFD 均匀性最好,为 92%,光学效率为 90%;当凸起高度 H 为 0.05 mm 和 0.15 mm 时,接收面的 PPFD 均匀性和光学效率都有所下降。因此,将鳞甲透镜凸起高度 H 确定为 0.1 mm。

3.3 鳞甲宽度 D 对植物灯接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响

在鳞甲透镜凸起高度 H 为 0.1 mm 的条件下,鳞

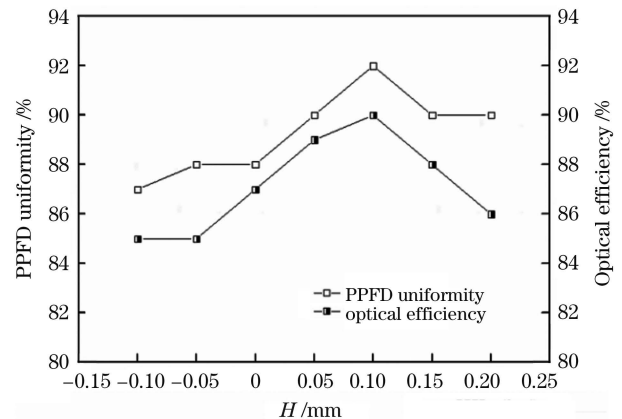


图 10 鳞甲凸起高度 H 对接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响

Fig. 10 Influence of scale bulge height H on PPFD uniformity and optical efficiency of receiving surface

甲宽度 D 对植物灯接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响如图 11 所示。不同的鳞甲宽度 D 下, PPFD 均匀性和光学效率不同; 当 D 为 0.35 mm 时, 接收面的 PPFD 均匀性达到最佳, 为 92%, 光学效率为 90%; 当鳞甲宽度 D 为 0.5 mm 时, 接收面的 PPFD 均匀性仅为 88%, 光学效率为 87%。因此, 鳞甲透镜的鳞甲宽度 D 确定为 0.35 mm。

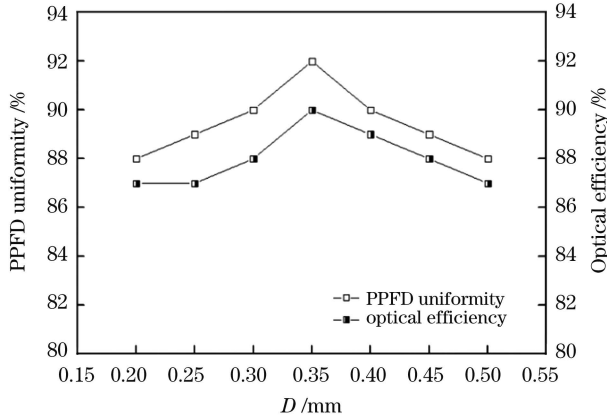


图 11 鳞甲宽度 D 对接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响
Fig. 11 Influence of scale width D on PPFD uniformity and optical efficiency of receiving surface

3.4 两个 LED 中心列间距 B 对植物灯接收面 PPFD 均匀性和光学效率的影响

本文采用的 14 颗蓝光 LED 和 70 颗红光 LED, 在尺寸为 380 mm × 220 mm 的植物灯中均匀分布为 7 行, 每行 12 颗 LED, 如图 12 所示。两个 LED 中心列间距为 B , 当 B 为 22 mm 时, LED 植物灯中紧凑排满了 LED 灯珠和鳞甲透镜, 如果 B 增大很多, LED 灯珠就会减少, LED 植物灯接收面的 PPFD 均匀性和光学效率就会受到影响。因此, 需要研究 B 的取值对接收面 PPFD 均匀性及光学效率的影响。由图 13 可以看出: 当 B 为 35 mm 时, LED 植物灯接收面的 PPFD 均匀性只有 85%; 当 B 为 25 mm 时, PPFD 均匀性为 92%。这说明 B 值不宜取太大。当 B 为 33 mm 时, 减少了一列灯珠。红光 LED 与蓝光 LED 光子数比 8:1, 根据灯珠的实际参数计算得到红光和蓝光 LED 灯珠的实际数量比为 5:1。按照这一比值来减少 LED

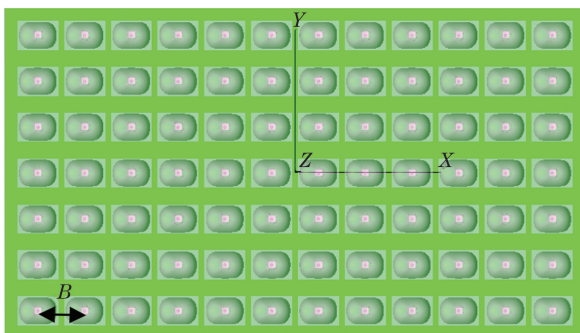


图 12 两个 LED 中心列间距 B 的示意图
Fig. 12 Schematic of spacing B between two LEDs center columns

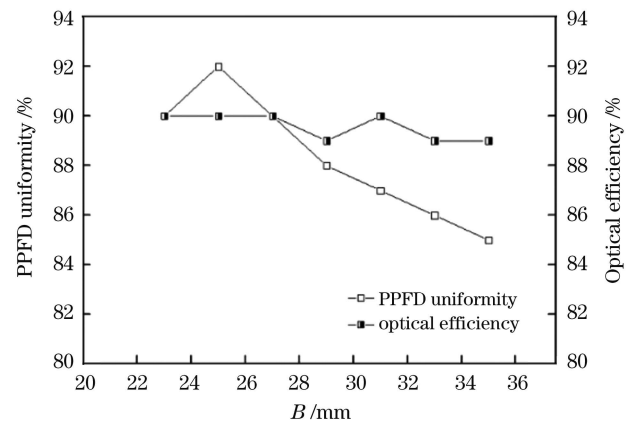


图 13 B 值对接收面均匀性和光学效率的影响
Fig. 13 Influence of B value on PPFD uniformity and optical efficiency of receiving surface

灯珠数量, LED 植物灯光源光谱的均一性基本不受影响。减少的这列灯珠没按比例减少, 并且距离较远, 导致接收面 PPFD 的均匀性降低。因此, B 的最佳取值为 25 mm。

3.5 整灯配光曲线

根据确定好的红光和蓝光 LED 排列方式及鳞甲尺寸参数, 在尺寸为 380 mm × 220 mm 的植物灯中, 将 84 颗 LED 光源均匀排列为 7 行, 每行 12 颗 LED, 并将设计好的鳞甲透镜放置于 LED 上方, LED 的下表面与鳞甲透镜下表面对齐, 将接收板设定在距 LED 植物灯出光面 50 cm 的位置, 在 TracePro 软件中对所设计的植物灯进行模拟仿真。LED 植物灯整灯配光曲线和平面照度分布的仿真结果如图 14 所示, 配光曲线由原来的 120° 朗伯光源变为 90° 蝙蝠翼配光, 光斑由原来中间照度值较大、照度不均匀的圆形光斑变为矩形光斑。仿真结果表明, 当鳞甲透镜长度为 22 mm, 宽度为 16 mm, 最大高度为 6.68 mm, 内表面的底面直径为 6.26 mm, 内表面高为 2.98 mm, 鳞甲凸起高度为 0.1 mm, 鳞甲宽度为 0.35 mm, B 为 25 mm 时, 植物灯的光束角为 90°, 接收面距植物灯出光面 0.5 m, 在 500 mm × 500 mm 的照明区域得到了 PPFD 均匀性为 92%、光学效率为 90% 的植物照明面光源。

3.6 实验验证

首先, 对 LED 植物灯的光源进行验证。本次实验选用的是型号为 LH351H 450 nm L4A4B 的蓝光 LED 和型号为 LH351H 660 nm V2 E7W410 的红光 LED, 利用光分布计对红光和蓝光 LED 进行配光曲线测试, 测试结果显示发光角度为 120°, 如图 15 所示, 与理论结果吻合。将数量比为 5:1 的红光和蓝光 LED 按照图 7(b) 所示的第二种方式进行排列, LED 植物灯光源板实物如图 16 所示。利用图 17(a) 所示的型号为 UPRTek 的手持光谱仪, 在距离 LED 植物灯出光面 50 cm 的位置处对 LED 植物灯光源进行测试, 实测光谱如图 17(b) 所示。由图 17(b) 可以看出, 红光和蓝光

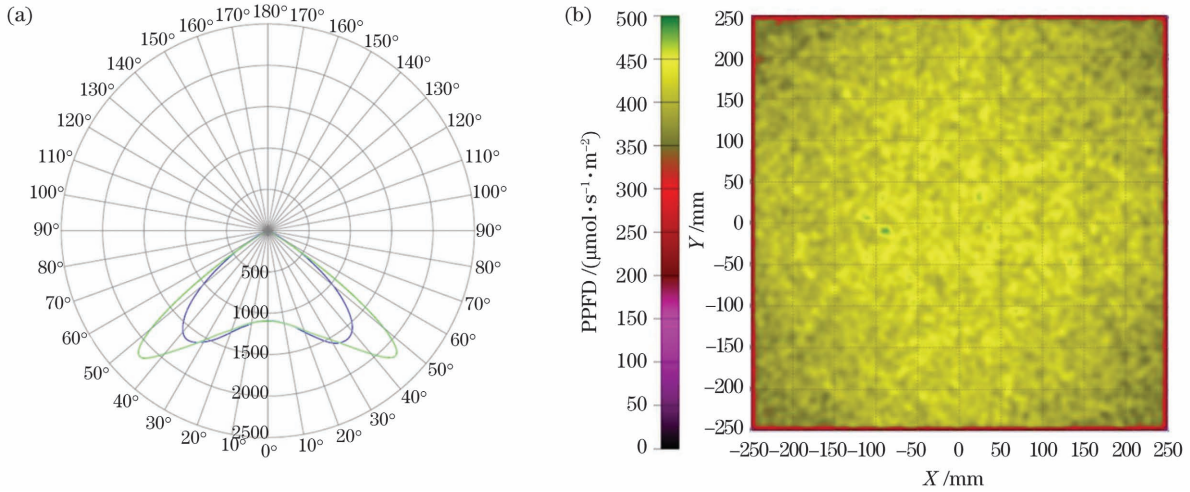


图 14 LED 植物灯整灯配光曲线图和平面照度分布图。(a) 配光曲线; (b) 平面照度分布图

Fig. 14 Light distribution curve and plane illumination distribution of LED plant lamp. (a) Light distribution curve; (b) plane illumination distribution

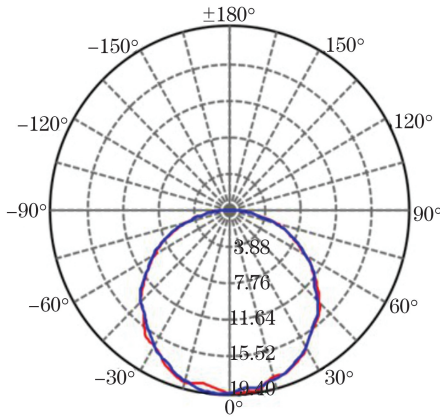


图 15 实测 LED 植物灯的配光曲线图

Fig. 15 Experimental light distribution curve of LED plant lamp



图 16 红光和蓝光 LED 均匀排列实物图

Fig. 16 Image of red and blue LEDs evenly arranged

LED 均匀排列方式下的 LED 植物灯的实测光谱与仿真光谱基本一致, 光谱均匀性好。

接下来根据 3.2 节和 3.3 节理论模拟仿真得到的鳞甲透镜的最佳参数(鳞甲凸起高度 H 为 0.1 mm, 鳞甲宽度 D 为 0.35 mm, B 为 25 mm, 鳞甲透镜长度为 22 mm, 宽度为 16 mm, 最大高度为 6.68 mm, 内表面的底面直径为 6.26 mm, 内表面高为 2.98 mm), 制作鳞甲透镜, 制作出来的 LED 植物灯整灯如图 18 所示。用光分布计对制作的 LED 植物灯进行配光曲线测试, 整灯的配光曲线如图 19 所示, 为蝙蝠翼配光曲线, 植物灯的光束角为 90° , 光学效率为 90%。

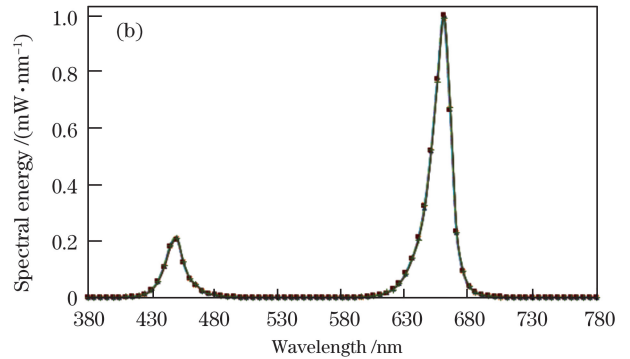
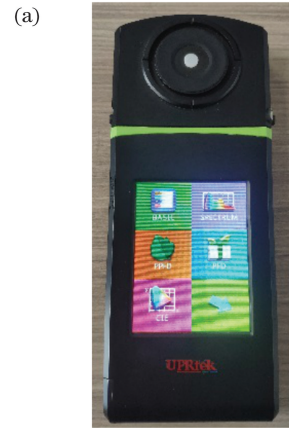


图 17 红光和蓝光 LED 均匀排列方式下的光谱测试。(a) 测试用 UPRtek 手持光谱仪; (b) LED 植物灯光源的 PPFD 图

Fig. 17 Spectrum testing with uniform arrangement of red and blue LEDs. (a) Handheld UPRtek spectrometer used in testing; (b) PPFD diagram of LED plant lamp light source

LED 植物灯整灯的配光曲线与理论模拟仿真结果略微不同, 这是因为鳞甲透镜在制作过程中存在误差。

最后, 利用 UPRtek 手持光谱仪对 LED 植物灯整灯的 PPFD 光谱进行测试, 测试结果如图 20 所示。将

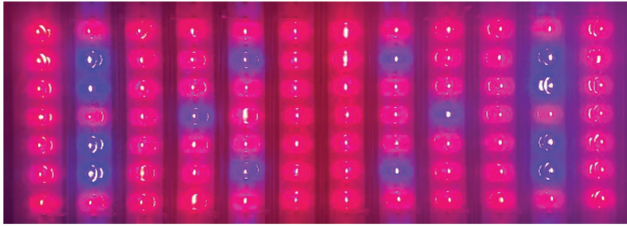


图 18 LED 植物灯带透镜整灯实物图

Fig. 18 Physical drawing of LED plant lamp with lens

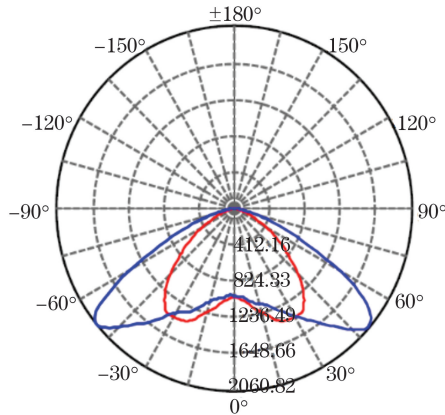


图 19 LED 植物灯整灯实验测试得到的配光曲线

Fig. 19 Light distribution curve of LED plant lamp in whole lamp experimental test

	50	150	250	350	450
450	398	417	430	415	397
350	424	436	446	433	422
250	436	443	450	442	434
150	426	437	445	436	424
50	400	419	431	418	399
	50	150	250	350	450

图 20 LED 植物灯整灯实验测试 PPFD 图

Fig. 20 PPFD diagram of whole lamp experimental test of LED plant lamp

接收面分为 25×25 个测试点, 图中接收面的最小 PPFD 为 $397 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均 PPFD 为 $426.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据式 (15) 可计算得到 PPFD 的均匀性 $U_0 = 397/426.32 = 93.12\%$ 。这表明, 本团队设计的鳞甲透镜能有效提高 LED 植物灯照明的均匀性和光学效率。

4 结 论

采用 14 颗 1 W 三星 3535 蓝光 LED 灯珠 (型号为 LH351H 450 nm L4A4B) 和 70 颗 1.6 W 三星 3535 红光 LED 灯珠 (型号为 LH351H 660 nm V2 E7W410) 作为植物灯光源, 在两种不同的 LED 阵列排布方式下对光谱均匀性进行对比。结果显示, 红光

和蓝光 LED 均匀排列方式下的光谱均匀性优于蓝光均分两列排列方式下的光谱均匀性。根据光学原理和非成像光学原理设计鳞甲透镜, 研究鳞甲透镜宽度和凸起高度对植物灯 PPFD 均匀性和光学效率的影响, 进而优化鳞甲透镜的结构参数。优化后的鳞甲透镜凸起高度 H 为 0.1 mm, 鳞甲宽度 D 为 0.35 mm, B 为 25 mm。整灯的实验测试结果表明, 所设计的 LED 植物灯在 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 照明区域内的 PPFD 均匀性为 93.12%, 光学效率为 90%。

参 考 文 献

- [1] 刘厚诚. LED 植物照明产业的发展现状与趋势[J]. 照明工程学报, 2018, 29(4): 8-9.
Liu H C. High uniformity LED panel-light for plant lighting[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(4): 8-9.
- [2] 符民, 文尚胜, 陈浩伟, 等. 基于 LSD 分析 LED 多重光谱配比对芦荟生长的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(3): 366-371.
Fu M, Wen S S, Chen H W, et al. LSD analysis based on multiple LED light quality ratio on growth of aloe[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(3): 366-371.
- [3] 刘彤, 刘雯, 马建设. 可调红蓝光光子比例的 LED 植物光源配光设计方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 154-159.
Liu T, Liu W, Ma J S. Distribution design method for LED plant light source with tunable ratio of red/blue photons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 154-159.
- [4] 曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2422001.
Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2422001.
- [5] 闫兴涛, 杨建峰, 张国琦, 等. 基于补偿法的均匀照明自由曲面 LED 反光杯设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 718-723.
Yan X T, Yang J F, Zhang G Q, et al. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 718-723.
- [6] 郝剑, 刘华, 孙强, 等. LED 自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 032302.
Hao J, Liu H, Sun Q, et al. Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.
- [7] 梁依倩, 文尚胜, 马丙戌, 等. LED 阵列型植物光源的均匀性研究[J]. 光学技术, 2017, 43(4): 343-347.
Liang Y Q, Wen S S, Ma B X, et al. Research on uniformity of LED array type plant light source[J]. Optical Technique, 2017, 43(4): 343-347.
- [8] 武礼宾, 曹立, 陈美香, 等. 植物培养箱内 LED 光源均匀性的研究[J]. 照明工程学报, 2015, 26(2): 104-109.
Wu L B, Cao L, Chen M X, et al. Study on uniformity of LED lights in plant growth chamber [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015, 26(2): 104-109.
- [9] 黄丹, 冯奇斌, 唐天, 等. 基于扩展光源的曲面能量映射优化设计方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222003.
Huang D, Feng Q B, Tang T, et al. Design method for surface energy mapping optimization based on extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222003.
- [10] 方深, 季杭峰, 季慧华, 等. LED 植物组培灯具的光照均匀性设计[J]. 中国照明电器, 2014(2): 1-5.
Fang Y, Ji H F, Ji H H, et al. Design of high illumination uniformity LED luminaires for plant tissue culture [J]. China Light & Lighting, 2014(2): 1-5.
- [11] 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于量子学的植物照明用自由

- 曲面底板 LED 光源设计[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0222001.
- Chen H W, Wen S S, Ma B X, et al. Design of plant lighting LED lamp with freeform surface substrate based on light quantum theory [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0222001.
- [12] 靳肖林, 文尚胜, 马丙戌, 等. 高均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 发光学报, 2018, 39(10): 1466-1477.
- Jin X L, Wen S S, Ma B X, et al. Design of high uniformity LED plant lamp[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(10): 1466-1477.
- [13] 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]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(3): 403-413.
- [14] 焦飞宇, 文尚胜, 马丙戌, 等. 立体化高空间照明均匀度 LED 植物光源的设计[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1822002.
- Jiao F Y, Wen S S, Ma B X, et al. Design of stereo LED plant light source system with high spatial illumination uniformity[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1822002.
- [15] 张博, 文尚胜, 马丙戌, 等. 多光源模块植物光源系统的设计[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1923001.
- Zhang B, Wen S S, Ma B X, et al. Design of plant light source system based on multi-light source module [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1923001.
- [16] 许冰聪, 蒋翰星, 陈章迪, 等. 基于 Zemax 的汽车新型反光杯设计[J]. 光学仪器, 2019, 41(4): 27-35.
- Xu B C, Jiang H X, Chen Z D, et al. Design of new car-reflectors based on Zemax [J]. Optical Instruments, 2019, 41(4): 27-35.
- [17] 韩敏, 叶正南, 施悦强, 等. 适用于 LED 阵列光源的新型双层 TIR 透镜设计[J]. 电子科技, 2017, 30(4): 128-130, 135.
- Han M, Ye Z N, Shi Y Q, et al. Research and design of novel double-layer TIR lens for LED source array [J]. Electronic Science and Technology, 2017, 30(4): 128-130, 135.
- [18] 黄碧云, 林志贤, 陈恩果, 等. 侧入式 LED 背光模组中光耦合模块的设计与实现[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222003.
- Huang B Y, Lin Z X, Chen E G, et al. Design and implementation of optical coupling module in side-LED backlight system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0222003.
- [19] 高丹, 庄晓波, 韩秋漪, 等. 植物照明的测试方法和照明设计[J]. 中国照明电器, 2016(1): 33-38.
- Gao D, Zhuang X B, Han Q Y, et al. Measurement method and lighting design in plant lighting [J]. China Light & Lighting, 2016(1): 33-38.

Design of High Uniformity Illumination Scale Lens for Light-Emitting Diode Plant Lamp

Lai Liping^{1*}, Zhuang Qiren²

¹ College of Computer Science and Information Engineering, Xiamen Engineering Institute University, Xiamen 361021, Fujian, China;

² College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract

Objective Currently, the approaches to achieving uniform illumination largely involve adjusting the array arrangement of light-emitting diode (LED) plant light sources, designing the structure of an LED light source board, and adding optical features such as diffusion plate or free-form surface baseplate. These approaches cannot effectively enhance the uniform illumination of LED plant light because the optical efficiency is not high, and it is not conducive to large-area lighting of LED plant lamps. The red and blue LED array light sources widely used in plant manufacturing have been tuned to provide spectral uniformity based on the aforementioned issues. The scale lens is then designed, and the light output by the LED is uniform by employing the scale radian of the scale lens, which improves the optical efficiency and uniformity of the light surface by increasing the light coupling degree. It has some practical utility and serves as a guide for consistent illumination of large-area plants in practical engineering.

Methods First, 14 pieces of 1 W Samsung 3535, type LH351H 450 nm L4A4B blue LEDs and 70 pieces of 1.6 W Samsung 3535, type LH351H 660 nm V2 E7W410 red LEDs were used as plant lamp light sources, divided into seven rows with 12 LEDs in each row with a size of 380 mm × 220 mm of LED plant lamp; the ratio and way of arrangement of the red and blue LEDs were studied. After comparing the spectra of two distinct LED array arrangement methods, the nine-point method was used to measure the spectrum. Second, a scale lens was designed according to optical and nonimaging optical principles. The scale radian of the scale lens ensures that the light output by the LED is uniform. Then, to find the best scale lens size, the impacts of different bulge heights, scales width, and the spacing between two LEDs center columns on photosynthetic photon flux density (PPFD) uniformity and optical efficiency were analyzed. Finally, the results were verified by experiment.

Results and Discussions It is the first time that a scale lens has been applied to an LED plant lamp to improve the illumination spectral uniformity and optical efficiency of the LED plant lamp. The homogeneous arrangement of red and blue LEDs was used to evaluate the LED plant light source. The experimental spectrum with uniform arrangement of red and blue LEDs in the LED plant light is essentially consistent with the theoretical simulation spectrum, and the spectral

uniformity is good (Fig. 17). The scale lens was designed according to optical and nonimaging optical principles. By comparing the effects of the width and convex height of the scale lens on the PPF uniformity and optical efficiency of the plant lamp, the optimized convex height H of the scale lens is 0.1 mm, the optimized scale width D is 0.35 mm, the optimized center column spacing B between two LEDs is 25 mm, the ray-tracing simulation with the TracePro software revealed that the light distribution curve of the whole LED plant lamp exhibits batwing light distribution. The experiment and simulation were well-accorded (Fig. 19). The test results show that the scale lens module has a PPF uniformity of 93.12% in the illumination area within 500 mm × 500 mm (Fig. 20), and optical efficiency of 90%, which is higher than the technical indexes reported in the references, thereby demonstrating the effectiveness of the scale lens.

Conclusions The software simulation demonstrates that when the photon number ratio of red light to blue light is 8:1, and 14 pieces of 1 W Samsung 3535, type LH351H 450 nm L4A4B blue LEDs, and 70 pieces of 1.6 W Samsung 3535, type LH351H 660 nm V2 E7W410 red LEDs are divided into seven rows with twelve LEDs in each row with a size of 380 mm × 220 mm of LED plant lamp, the spectral uniformity of uniform arrangement of red LED and blue LED is better than that of uniform arrangement of blue LED in two columns. The experimental findings reveal that when the length of the scale lens is 22 mm, the width is 16 mm, the maximum height is 6.68 mm, the diameter of the bottom surface of the inner surface is 6.26 mm, the height is 2.98 mm, the height of the scale protrusion is 0.1 mm, the width of the scale is 0.35 mm, and the distance between the center columns of the two LEDs is 25 mm, the beam angle of the plant lamp is 90°, the receiving surface is 0.5 m away from the light-emitting surface of the plant lamp, and the 500 mm × 500 mm plant illumination surface light source with PPF uniformity of 93.12% and optical efficiency of 90% is obtained in the illumination area.

Key words optical devices; LED plant lamp; scale lens; spectral uniformity; photosynthetic photon flux density uniformity; optical efficiency