

基于光量子学的植物照明用自由曲面底板 LED 光源设计

陈浩伟¹, 文尚胜^{1,2}, 马丙戌^{1,2}, 符 民^{1,2}, 谢 雅¹

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

摘要 基于光谱的光量子学照明系统评价方法,能使现代农业发光二极管(LED)植物照明系统具有可重复性,具有实用意义。基于光量子理论,采用高出光效率、高均匀度的自由曲面底板设计方法,并使用脉冲宽度调制驱动方法,设计了一款应用自由曲面底板的红蓝光 LED 植物照明用灯具,并对其参数进行测量。将仿真结果与实验结果进行对比详细分析了传统照明设计方法在 LED 植物照明中的意义。实验结果表明,所设计的灯具光量子通量密度均匀度约为 80%,灯具最高温度约为 50 °C。由于没有使用扩散板等二次配光手段,灯具出光效率可视作 100%,比使用扩散板的情况提高了 34.5%以上,大大减少了植物照明的能耗。扩散板的引入会降低所设计灯具的光量子通量密度均匀度,而对混光均匀度影响不大。因此,在植物照明使用的红蓝光 LED 组合中,使用自由曲面底板的一次配光方法比使用扩散板的二次配光方法更为简便有效,更符合植物照明的设计需求。

关键词 光学设计; 植物照明; 光量子学; 自由曲面底板; 发光二极管; 一次配光; 现代农业

中图分类号 TU113.6+68; TM923.01 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0222001

Design of Plant Lighting LED Lamp with Freeform Surface Substrate Based on Light Quantum Theory

Chen Haowei¹, Wen Shangsheng^{1,2}, Ma Bingxu^{1,2}, Fu Min^{1,2}, Xie Ya¹

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

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

Abstract The illumination system evaluation method with light quantum theory based on spectra makes light emitting diode(LED) plant lighting system repeatable in modern agriculture, which has practical significance. Based on the light quantum theory, a red/blue LED plant lighting lamp with freeform surface substrate is designed and its parameters are measured with a freeform surface substrate design method, which has high light efficiency and high uniformity, and the pulse width modulation drive method is used. Moreover, the significance of the traditional illumination design method in LED plant lighting is analyzed in detail by comparing the experimental results with the simulation results. The experimental result shows that the photosynthetic photon flux density uniformity of the designed lamp is approximately 80%, and the highest temperature is about 50 °C. The light efficiency of the lamp can be regarded as 100%, when light diffusion plates and other secondary light distribution methods are not used, and it is 34.5% higher than that of the case when a diffusion plate is used. Energy consumption for plant illumination is reduced greatly. In addition, the use of the diffusion plate will reduce the photosynthetic photon flux density uniformity of designed lamp, but have little influence on light mixing uniformity. Consequently, the primary light

收稿日期: 2016-08-10; **收到修改稿日期:** 2016-10-10

基金项目: 国家文化部项目(GJWHKJTSXM20154464)、广东省科技计划(2013B090600048, 2015B010134001, 2015B010127004, 2015YT02C093, 201604010006)、国家级大学生创新创业训练计划(201610561075)

作者简介: 陈浩伟(1995—),男,硕士研究生,主要从事 LED 灯具及照明设计方面的研究。E-mail: chwscut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事 LED 及 OLED 等方面的研究。

E-mail: shshwen@scut.edu.cn(通信联系人)

distribution method with the freeform surface substrate is more suitable and practical than the secondary light distribution methods with the diffusion plates for the red/blue LED combination in plant lighting.

Key words optical design; plant illumination; light quantum theory; freeform surface substrate; light emitting diode; primary light distribution; modern agriculture

OCIS codes 220.2945; 300.6170; 350.2660; 170.1420

1 引 言

在现代农业植物照明领域,光照系统往往是整个系统中最重要也是最昂贵的部分^[1]。随着发光二极管(LED)制造技术革新和生产成本下降,LED凭借体积小、效率高、寿命长、光谱可控以及可近距离照射等优点成为植物照明的首选光源^[2-3]。以LED为光源的灯具在现代农业生产中具有良好的应用与发展前景^[4]。与基于光度学和色度学的传统LED光源设计不同,LED植物照明系统需要新的理论支撑以适合植物生长需求,光量子理论是现今最适合的指导理论。光量子理论适用于植物照明领域,具有切合植物实际需求、光源可重复性高等优点。灯珠比相同时,由于LED封装及散热能力的不同、LED芯片的不同、光谱漂移等原因,传统LED光源会出现差异较大的光谱^[5-6],而光量子理论通过对光谱的详细描述能有效提高灯具光谱的可重复性。

LED是一种无机固态半导体器件,具有明显的发光指向性,在二次配光设计时可以看作朗伯光源^[7],经过二次光学处理才能符合使用要求^[8-9]。但是二次配光需要通过各种反光材料、光学扩散材料制作的光学透镜或反光杯来实现,光学材料的特性极大地影响了照明器件的系统光效,光衰现象非常严重。目前二次配光的光学器件多使用聚碳酸酯(PC)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、硅胶、环氧树脂等材料,其耐候性和耐高温特性比较差,是实现LED光源系统超长寿命的主要障碍^[10],这不利于注重电力成本、灯具成本、灯具寿命等因素的现代农业的发展。

本文设计了一款红蓝LED植物照明灯具,将LED芯片直接安置在自由曲面的底板表面,并对设计灯具进行测试。该灯具摒弃了传统照明常用的二次配光方法,光直接照射在受照面上,使理论出光效率可达100%^[11]。采用脉冲宽度调制(PWM)驱动方法,可以独立控制红蓝LED的亮度,使其适合植物生长需要。此外,通过对灯具添加传统照明常用的扩散板元件^[12],探讨了扩散板等传统二次配光方法在植物照明领域的应用价值。

选取国际照明委员会(CIE)指定的三原色波长 $\lambda_R=700\text{ nm}$ (红光), $\lambda_G=546.1\text{ nm}$ (绿光), $\lambda_B=435.8\text{ nm}$ (蓝光),并按照习惯称波长在 λ_R 、 λ_G 和 λ_B 附近的光为红光、绿光和蓝光^[13]。

2 传统照明与植物照明的区别

2.1 照度与光量子通量密度

传统照明中常用光度学量表示人眼对光的响应。光度学量是一个经过人眼视觉响应函数修正的参数。而人眼与植物的响应是不同的,因此光度学量并不适合于植物照明领域。在植物照明领域中,通常使用光量子通量密度(PPFD),即单位时间内通过单位面积的光子数,来评判光源的照明效果,其单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。使用光量子通量(PPF),即单位时间内光源所发射的光子数目,来评判光源的出光特性,其单位为 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 。

传统照明经过多年的发展,光度学参数的测量已经相当成熟。而PPFD与PPF需要分别由彩色光谱照度计、积分球测量得到绝对光谱,再通过积分计算得出。计算方法如下

$$D_{\text{PPFD}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_{e,\lambda}}{n_A hc} d\lambda, \quad (1)$$

$$\Phi_{\text{PPF}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\phi_{e,\lambda}}{n_A hc} d\lambda, \quad (2)$$

式中 D_{PPFD} 为光源的PPFD值, $E_{e,\lambda}$ 为光源在某一波长 λ 下的辐照度, hc/λ 为某一波长 λ 的光子能量, n_A 为

阿伏伽德罗常数, λ_1, λ_2 为积分的波长范围, Φ_{PPF} 为光源的 PPF 值, $\phi_{e,\lambda}$ 为光源在某一波长 λ 下的辐射通量。

类似于照度均匀度, 在光量子学中可以通过采集 9 点、15 点或者其他点数的样本, 计算得到 PPF 的均匀度 U_p 为

$$U_p = \frac{D_{\min}}{D_{\text{avg}}}, \quad (3)$$

式中 D_{\min} 为受照面上的最小 PPF 值, D_{avg} 为平均 PPF 值。 U_p 值在 0~1 之间, 越接近 1, 说明均匀度越高。

2.2 色坐标与光质比

传统照明中采用色度学量来评价光的颜色。在 CIE1976 色度体系中, 两束不同光谱组成的光, 只要色坐标 (u', v') 与亮度 Y 相同, 人眼便不能分辨其区别。植物对不同的颜色也有不同的响应, 且对不同的光谱组成敏感, 因此可以认为植物比人眼更为灵敏。红蓝 LED 光源常用于植物照明^[14], 红蓝光的 PPF 比值称为光质比, 用 (R, B) 来表示其光量子学中的色坐标, 其中 R 为混合光中红光的 PPF 值, B 为蓝光的 PPF 值, 且将两者约化为最简数。值得注意的是, 随着国内外各课题组对绿光、红外光的深入研究^[15-17], 以后光质比也可定义为红外、红、绿、蓝四色光 PPF 的比值。

2.3 混色均匀度与混光均匀度

在光度学中, 混色均匀度定义为样本点的 CIE1976 色坐标 u', v' 的差异, 用各个样本点色坐标的均方根值 $R_{\Delta u'v'}$ 来表示, 其计算公式为^[11, 18-20]

$$R_{\Delta u'v'} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(u'_i - u'_{\text{avg}})^2 + (v'_i - v'_{\text{avg}})^2]}, \quad (4)$$

式中 M 为样本点的数目, $u'_{\text{avg}}, v'_{\text{avg}}$ 为色坐标平均值。均方根值越小, 说明色坐标差异越小, 混色均匀度越高。但是, 由于计算得到的均方根值 $R_{\Delta u'v'}$ 通常很小, 不方便描述, 因此, 混色均匀度计算公式可改写为^[19-20]

$$U_c = \frac{100}{1 + k_1 R_{\Delta u'v'}}, \quad (5)$$

式中 U_c 为混色均匀度, k_1 是一个自定义常数。选取 $k_1 = 46.70$, 使实验过程中测得的最高混色均匀度为 90%。

类似地, 将混光均匀度定义为样本点的红蓝光 PPF 差异, 用各个样本点红蓝光 PPF 值的均方根值 $R_{\Delta RB}$ 来表示, 计算公式为

$$R_{\Delta RB} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_i^M [(R_i - R_{\text{avg}})^2 + (B_i - B_{\text{avg}})^2]}, \quad (6)$$

式中 $R_{\text{avg}}, B_{\text{avg}}$ 分别为红光和蓝光的 PPF 均值。混光均匀度计算公式为

$$U_1 = \frac{100}{1 + k_2 R_{\Delta RB}}, \quad (7)$$

式中 k_2 为自定义常数。均方根值 $R_{\Delta RB}$ 越小, 说明红蓝光 PPF 差异越小, 混光均匀度越高。选取 $k_2 = 0.0549$, 使实验过程中测得的最高混光均匀度为 90%。

3 灯具设计与驱动

3.1 自由曲面底板设计方法

相对于传统照明常用的透镜、反光杯二次光学设计, 自由曲面底板的设计方法更为简单。这是一种目标导向型的设计方法, 光效更高, 灯具整体寿命更长。自由曲面底板的设计方法是对 LED 的一次配光设计, 通过调控 LED 发射轴线的方向而达到聚光、散光等目标照明效果。

由于 LED 自身线度远小于照射距离, 因而在 LED 光学设计时常将其近似为朗伯型点光源。图 1 所示为单颗 LED 的情况。在 xoy 直角坐标系中, 假设 LED 处于点 $A(x, 0)$ 点, 光线 AC 与 LED 轴线夹角为 θ 。作 LED 轴线与 y 轴交点 B , 并以点 B 为圆心、以点 B 到 LED 的距离为半径 R 作圆。设 LED 所在平面与远处光屏的距离为 a ^[10]。在自由曲面设计时, 依照目标配光曲线给定 a, x, θ , 因此可以通过求解

$$R_0 = \left[\frac{(x^2 + a^2) \sin^2 \theta}{x^2} - 1 \right] R^2 - \frac{2a \sqrt{x^2 + a^2} \sin \theta}{x} R + x^2 + a^2 \quad (8)$$

的零点,即可得到 LED 处自由曲面底板的曲率半径 R_0 。

采用红蓝双色 LED,先设定红蓝灯珠的排列方式从而获得(8)式中的 x 值。由于现代农业需要分层种植以提高土地利用效率,因此灯具应在短的照射距离下具有较大的照射面积与较高的均匀度。假设照射距离 $a = 500 \text{ mm}$ 。通过计算,确定所需灯具每排应设置 14 个 1 W 的蓝光 LED 灯珠,4 个 1 W 的蓝光 LED 灯珠,共设置 3 排。排间距为 40 mm,LED 灯珠间距为 10 mm,灯具中央两颗 LED 灯珠间距为 40 mm,即 x 取值集合为 $\{20, 30, 40, \dots, 100\}$,此时取 $\theta = 45^\circ$ 。当 x 取值集合为 $\{-100, -90, -80, \dots, -20\}$ 时,取 $\theta = -45^\circ$ 。灯具总宽度为 220 mm。将上述数据代入(8)式中,计算得到各个灯珠所在位置底板曲率半径的初始值。

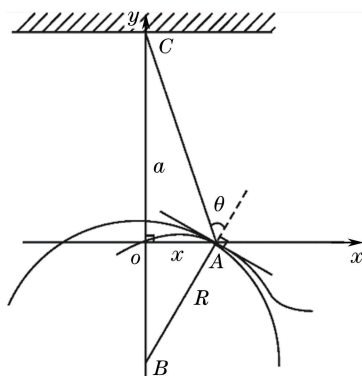


图 1 单颗灯珠的自由曲面底板设计方法

Fig. 1 Freeform surface substrate design method for single LED

根据曲率半径拟定 y 值,使用光滑曲线连接并得到自由曲面底板模型,并使用 TracePro 软件进行仿真。为保证最后的混光均匀,对红蓝 LED 进行单独设计,即先对红光 LED 进行仿真优化,再对蓝光 LED 进行仿真优化。由于光照是线性叠加的,当红蓝光 LED 能分别形成均匀照明时,同时点燃后也会是均匀的。仿真时,设定每个灯珠追击线数为 10^6 ,受照面为 500 mm 外大小为 $1100 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 的完全吸收平面,取 15 点,点间距为 250 mm,如图 2 所示。使用(3)式来计算均匀度。

通过调整灯珠坐标的 y 值以及曲率半径获得新的自由曲面底板模型,并进行迭代仿真优化,得到的最终模型如图 3 所示,该模型通过仿真得到的照度均匀度为 72%,PPFD 均匀度为 70%。

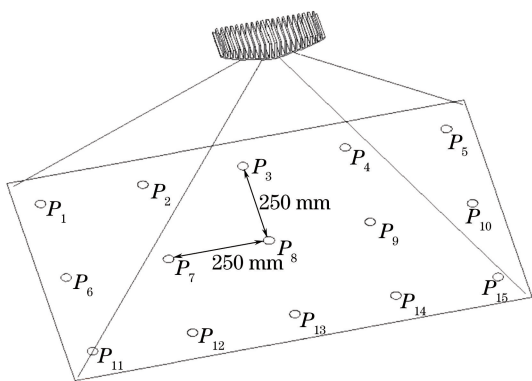


图 2 取样点位分布

Fig. 2 Arrangement of sampling point

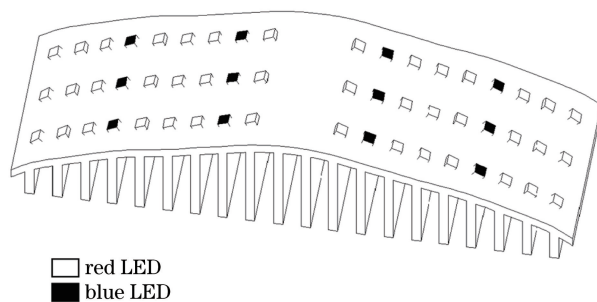


图 3 自由曲面底板灯具示意图

Fig. 3 Lamp at freeform surface substrate

最终设计出一种长条形灯具,如图 3 所示。灯具底板为凸面自由曲面,可以实现高光效、大角度的均匀出光,有利于其在大面积植物工厂的应用。红蓝光 LED 的间隔布置,可以提高混光均匀度。通过调整自由曲面底板关键位置的曲率半径,可以控制整个灯具的出光角度。与传统的透镜、反光杯设计相比较,该设计更为简单、实用。

3.2 PWM 驱动方法

PWM 是一种利用某一频率下不同占空比的方波信号,对工作器件进行调制的方法。在传统照明中,工作频率通常控制在 60 Hz 以上,利用人眼的视觉暂留效应,在人眼察觉不到光源闪烁的前提下调整 LED 在

一个周期中的工作时长,从而实现调光功能。PWM 调光可以很好地与数字控制技术结合,在智能照明领域具有很大的优势,改变驱动 LED 的 PWM 占空比,其色坐标基本不发生改变,而光通量与占空比近似呈正比例函数关系^[21-22]。在 PWM 调光过程中随着调制占空比的上升,LED 的工作时间逐渐加长,结区将会产生更多的热量。在热平衡状态下,占空比越高,则结温越高。结温升高引起的色漂移与出光效率降低会导致混合比例失调。为了减小由结温变化引起的误差,需要外加散热装置^[23]。在灯具散热良好的前提下,结温变化引起的峰值波长及半峰全宽变化十分微小,可以忽略不计。因此,实验中可以认为调光过程中光谱功率分布只有强度发生变化,峰值波长与半峰全宽不变^[23]。则 LED 的功率 P_{PWM} 可以简化为^[24]

$$P_{\text{PWM}} = DP_{\text{max}}, \quad (9)$$

式中 D 为 PWM 驱动的占空比, P_{max} 为 LED 功率的最大值。灯具输出的光谱功率分布满足^[25]

$$S_m(\lambda) = D_R S_R(\lambda) + D_B S_B(\lambda), \quad (10)$$

式中 $S_R(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ 分别为红蓝光 LED 在满电流工作状态下的光谱功率分布, D_R 、 D_B 分别为红蓝光 LED 的驱动占空比。改变驱动 LED 的 PWM 占空比且 $D_R = D_B$ 时,红蓝光 PPF 比值也基本不变,总 PPF 与占空比近似呈正比例函数关系。

4 实验结果

实验中用图 3 所示的自由曲面底板灯具,其扩散板根据实验需要进行增减或位置调整。使用 PWM 驱动时设置红蓝驱动占空比 $D(D_R = D_B)$ 为 1.00, 0.85, 0.70, 0.55, 0.40, 0.25, 0.10, 调制频率为 60 Hz。使用远方 PMS-80 光谱测试仪测量灯具在不同占空比下的色度学参数及光谱功率分布;使用 FLIR E30 红外热成像仪测量灯具在不同占空比下的灯珠外部最高温度;使用远方 SPIC-200B 光谱彩色照度计测量灯具在满电流工作时没有扩散板或不同扩散板位置下受照面的光谱功率分布。上述光谱、温度均在灯具热平衡状态下进行测量,测量时环境温度为 27 °C。

4.1 PWM 驱动下的光谱光质比

图 4 所示为红蓝光 LED 灯珠的外部最高温度与不同占空比的 PWM 波形驱动关系。所用红蓝灯珠的峰值波长分别为 635 nm 和 445 nm。由图 4 可见,占空比 $D=1.00$ 时红蓝灯珠温度均有最大值 51.7 °C(红光 LED)、50.5 °C(蓝光 LED)。随着占空比的上升,灯珠的最高温度逐渐上升。取占空比 D 为 0.10 和 1.00 的两点作比较,灯具温度提高了 19.3 °C。由于红蓝灯珠共用同一块底板且间距较近,两者的温度也较为接近。当占空比 $D < 0.85$ 时,蓝光 LED 外部最高温度总是大于红光 LED 的外部最高温度,而在占空比 $D=1.00$ 时出现了反转,可能是因为实验所用的红光 LED 相较于蓝光 LED,在满电流工作时电光转换效率衰减较大,使其结温上升幅度更大,影响了灯具的温度分布。

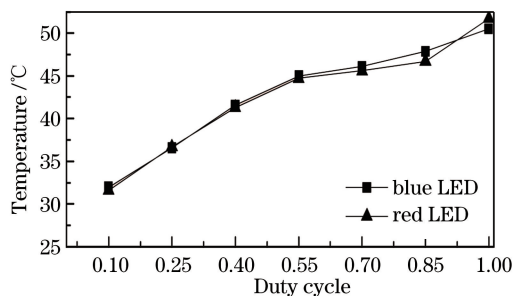


图 4 不同占空比下的 LED 灯珠温度

Fig. 4 LED temperature in different duty cycles

图 5 是设计的灯具在不同占空比的 PWM 波形驱动下的光谱图。随着驱动占空比的上升,蓝光 LED 的峰值波长与半峰全宽变化很小,可以忽略不计;红光 LED 的峰值波长与半峰宽度变化相对较大,取占空比为 0.10 和 1.00 的两条光谱曲线相比较,峰值波长向长波方向移动 2 nm,半峰宽度也略微变化。但是,上述 2 nm 的峰值波长移动是由于测试时占空比差距很大,导致结温差距变大,而灯具实际使用时不会使用如此低的占空比($D=0.10$),否则会造成灯具购置成本的浪费。当占空比大于 0.70 时,峰值波长移动小于 1 nm,

半峰宽度变化也可以忽略,因此认为实验结果与 3.2 节的叙述相符合。

此外,由于实验所用的红光 LED 相较于蓝光 LED 结温上升幅度更大,因而光谱漂移更大。红蓝光 LED 芯片材料不同,红光芯片的波长偏移系数略大于蓝光芯片,这进一步加剧了两者光谱变化的差异。

图 6 所示为在不同占空比的 PWM 波形驱动下,总 PPF 与占空比近似呈正比例函数关系,仅在占空比 $D=1.00$ 时出现了微小偏离,同时在占空比 $D=1.00$ 时红蓝光 PPF 比值 $[R/B(PPF)]$ 出现了 2.6% 的下降。这进一步证明上述实验所用的红光 LED 在满电流工作时电光转换效率衰减较蓝光 LED 更大的论述,因而红光 LED 的光通量相对于理想情况出现下降。但是,由于 $R/B(PPF)$ 在 1.25~1.30 之间变化且较为平缓,因此认为 $D_R=D_B$ 时占空比的 PWM 驱动对 $R/B(PPF)$ 影响不大。实验结果与 3.2 节所述的理论相吻合,认为 PWM 调光技术可以运用于植物照明。根据植物的实际需求调整红蓝光 LED 各自的驱动占空比,以达到更好的生长促进效果,并且节约能耗。此外,实验中灯具温度波动不大,峰值波长与半峰全宽变化不大,可以忽略不计,证明该设计的散热能力良好,能长时间稳定运行。

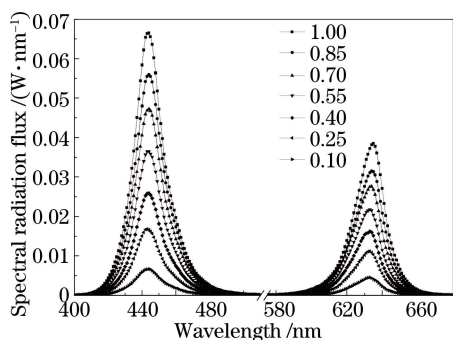


图 5 不同占空比下的绝对光谱图

Fig. 5 Absolute spectrogram in different duty cycles

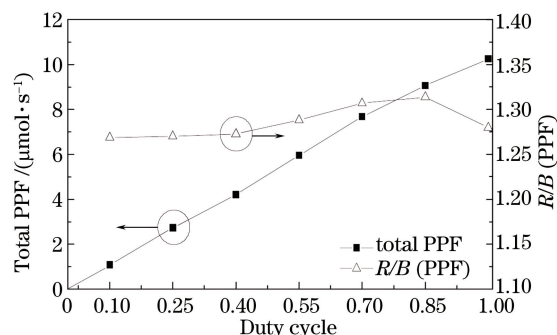


图 6 不同占空比下的总 PPF 与红蓝光 PPF 比值

Fig. 6 Total PPF and R/B PPF in different duty cycles

4.2 扩散板位置对均匀度的影响

将一块 PC 材质的扩散板放置在灯具出光侧上方,假设图 7 所示的参数 d 为扩散板与自由曲面底板的最小距离,用于研究扩散板的有无、扩散板与自由曲面底板的间距大小对混光效果和出光效率的影响。

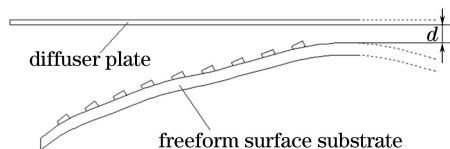


图 7 扩散板与自由曲面底板的最小距离

Fig. 7 Minimum distance between diffuser plate and freeform surface substrate

图 8 所示为实测数据,包含了 PPF 效率、混色均匀度、混光均匀度、照度均匀度、PPFD 均匀度 5 条曲线。其中,PPFD 效率定义为有扩散板时受照面各测试点的 PPF 总和与没有扩散板时受照面各测试点的 PPF 总和的比值。对于实验所用的自由曲面灯具,当加入扩散板($d=0$)时,混光均匀度、照度均匀度与 PPF 均匀度都有微弱提升。其中,混光均匀度提高约 5%,照度均匀度、PPFD 均匀度提高约 3%。但 PPF 效率下降了 34.5%。随着扩散板与自由曲面灯具的间距 d 的增加,4 个均匀度参数都呈现先降后升的趋势,但仍低于不使用扩散板的情况,当 $d=2$ cm 时达到极小值。PPFD 效率则在总体上呈现逐渐下降的趋势。

为探求上述现象的具体成因,使用 TracePro 软件对灯具模型进行仿真对照。仿真时采用双面棱镜的扩散板。图 9 所示为 TracePro 仿真数据,包含了混光均匀度、照度均匀度、PPFD 均匀度 4 条曲线。图 10 为扩散板位置变化时,红蓝光 LED 在受照面上造成的最大照度点与照面中心的距离的变化情况。图 11 为仿真的具体图像,图中代号分为两个部分:R 代表仅红光 LED 被仿真,而 B 代表仅蓝光 LED 被仿真;without diffuser 代表没有使用扩散板的情况,而 0、1、2 等数字代表使用了扩散板,分别与自由曲面底板的最小距离 d (cm)。各小图左侧色阶图表示辐照度,其单位为 W/m^2 ,越接近白色表示辐照度越大。扩散板的工作原理是塑料微球或微棱镜对光的偏折。对于植物照明所用的红蓝光 LED 光源,由于红蓝光波长差异很大,两者

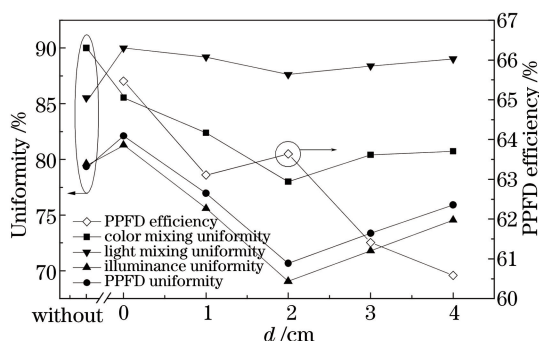


图 8 扩散板位置对均匀度参数及 PPFD 效率的影响

Fig. 8 Effect of diffuser plate position on uniformity parameters and PPFD efficiency

在扩散板中的折射率并不一致,即使入射角度相同,蓝光的出射角度也会比红光更大,导致类似色散的效应。其表现为图 9 中红蓝光 LED 在受照面上形成的光斑位置变化情况不一致。具体的光斑变化情况如图 11 所示,随着 d 的增加,光斑峰值辐射通量逐渐降低,光斑变得更大。

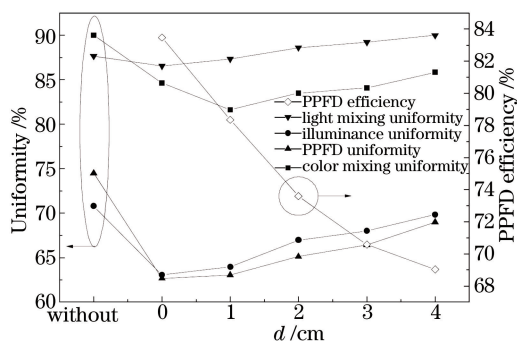


图 9 扩散板位置对均匀度参数以及 PPFD 效率的影响仿真结果

Fig. 9 Simulated effect of diffuser plate position on uniformity parameters and PPFD efficiency

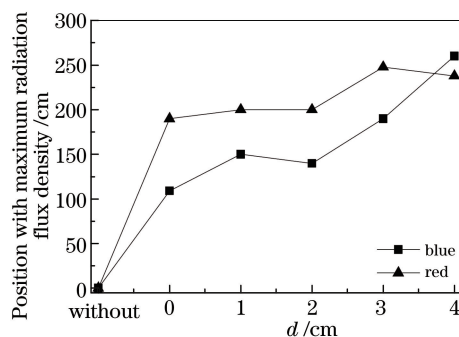


图 10 扩散板位置对最大辐照度位置的影响
Fig. 10 Effect of diffuser plate position on maximum irradiation position

加入扩散板后,PPFD 效率出现大幅下降,约为 17% ($d=0$)。随着 d 的增加,PPFD 效率迅速而平滑地下降,这与实验结果相吻合。原因从图 11 中可以看出, d 增加时,LED 在受照面上形成的光斑越来越分散,因此有更多的光落在受照面以外,使得 PPFD 效率不断下降。因此,图 8 中 d 为 1~2 cm 时出现 0.5% 的 PPFD 效率提升可能是由于实验误差造成的,其准确曲线应该是平滑下降的。如(6)式所示,混光均匀度表征各个测试点间红、蓝光各自的 PPFD 差异的和。加入扩散板后由于光线能量的分散,各测试点间能量分布更为均匀,因而混光均匀度随着光斑的分散逐渐提高。

混光均匀度、混色均匀度、照度均匀度与 PPFD 均匀度的仿真结果与实验结果的变化趋势大致相同,只是转折的位置不同,这是扩散板的仿真模型不同于实际使用的扩散板所致。相对于混光均匀度,照度均匀度与 PPFD 均匀度对扩散板位置的变化更为敏感,且后两者的变化更为一致。这是由于照度均匀度与 PPFD 均匀度均是在绝对光谱数据的基础上,分别经过人眼视觉函数 $V(\lambda)$ 修正、CIE1976 色度学系统加权得出的。当光谱不变时,照度与 PPFD 的比值为一常数,该常数仅与光谱组成有关。在计算均匀度时该常数被约分消除,故照度均匀度与 PPFD 均匀度一致。但是,由于不同位点的光谱有微小差异,导致计算照度与 PPFD 的系数变化偏离了照度均匀度与 PPFD 均匀度曲线。

综上所述,光量子学理论比传统照明领域的光度学、色度学更适用于植物照明。统一地使用光量子学参数,可以使灯具设计的理论框架更清晰,且更贴合植物实际需求。另外,对于所设计的自由曲面灯具,引进传统照明常用的扩散板后,除了混光均匀度外,其他三种均匀度参数都不升反降 ($d > 0$),光衰减非常明显 (34.5% 以上),因此认为在红蓝光 LED 植物照明领域中,特别是自身已经对照明均匀度有所优化的自由曲面底板灯具,扩散板、扩散膜并不如其在传统照明中那样重要。此外,在现代农业植物照明中,高额电费是主

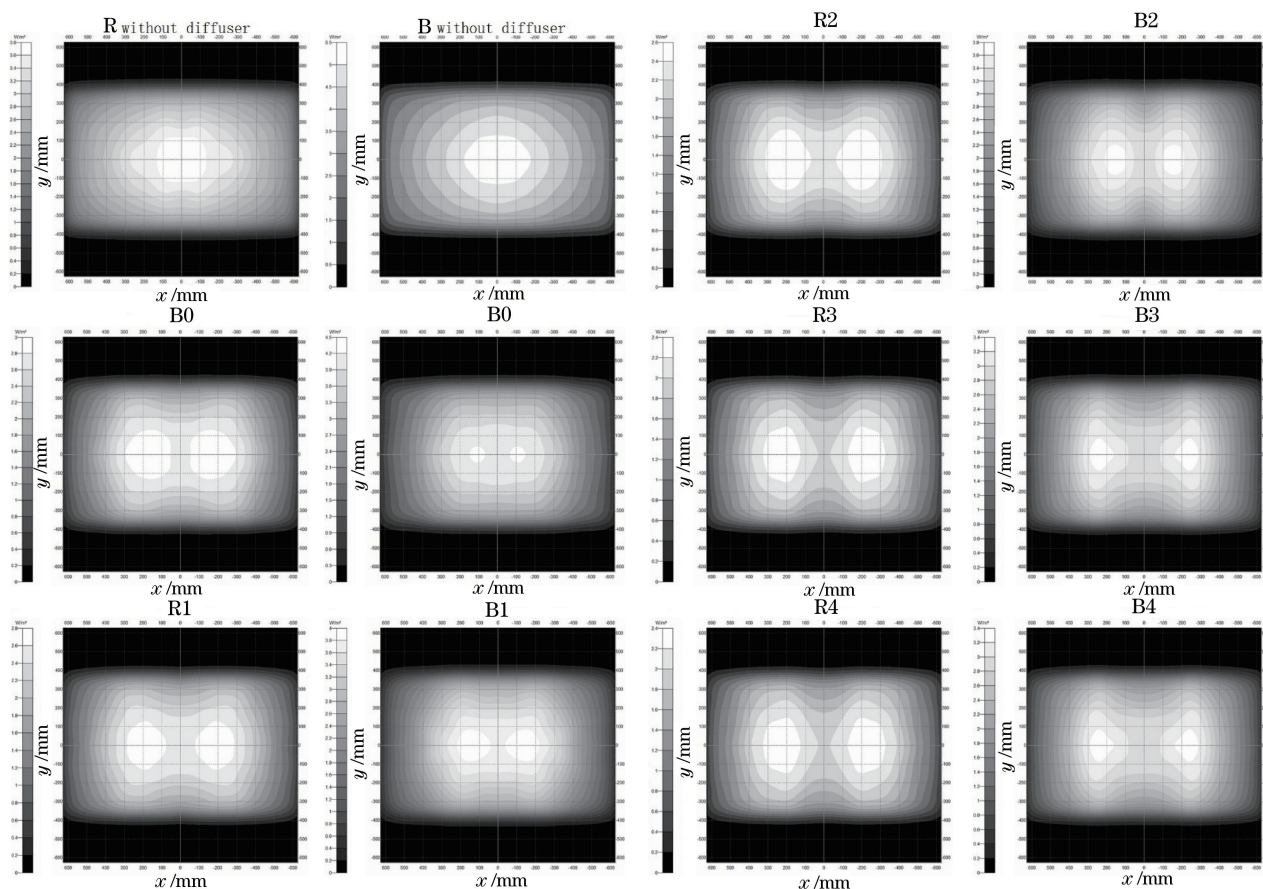


图 11 光斑分布随扩散板位置的变化

Fig. 11 Change of spot distribution with diffuser plate position

要的生产成本,引入扩散板、扩散膜会大幅降低灯具出光效率,提高照明成本,不利于植物工厂的运行。

5 结 论

在适用于植物照明的灯具设计中,光量子学参数相较于光度学、色度学参数更为适用,更能描述植物实际的生长需求,且更能描述灯具的光谱特性,使设计的灯具具有更高的可重复性。基于光量子学理论设计了一款具有自由曲面底板的新 LED 植物照明灯具。该灯具使用自由曲面底板的设计方法,具有出光效率接近 100%、高混光均匀度、高 PPF 均匀度、设计简单等优点。使用 PWM 驱动方法,使得红蓝光 LED 光强独立可调,可以根据植物实际需要调整灯具的发射光谱。实验表明,灯具的光量子通量密度均匀度约为 80%,出光效率高,混光均匀度高,光谱可调,散热性能好,能很好地满足现代农业植物照明需求。另外,对扩散板等散射元件在植物照明中的应用进行仿真与实验分析,结果表明植物照明光源设计不应直接使用传统照明的散射元件,应采用出光效率和混光均匀度更高、设计更为简单的自由曲面底板设计方法,所设计出的灯具在保证照明充足且均匀的前提下节省大量用电成本,相对于传统照明领域常用的高光衰减率的二次配光方法具有巨大优势。所设计的具有自由曲面底板的新 LED 植物照明灯具具有较高的实用价值,使用的自由曲面设计方法在植物照明领域应用前景十分广阔。

参 考 文 献

- [1] Bourget C M. An introduction to light-emitting diodes[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1944-1946.
- [2] Morrow R C. LED lighting in horticulture[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [3] Cui Jin, Xu Zhigang, Di Xiuru. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 249-253.
崔 瑾, 徐志刚, 邸秀茹. 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.

- [4] Fu Min, Wen Shangsheng, Chen Haowei, *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.
符 民, 文尚胜, 陈浩伟, 等. 基于 LSD 分析 LED 多重光质比对芦荟生长的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(3): 366-371.
- [5] Tian Lixin, Wen Shangsheng, Huang Weiming, *et al.* Study on the heat sink structure and heat transfer effect of liquid cooling system for high power LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0323003.
田立新, 文尚胜, 黄伟明, 等. 大功率 LED 液冷热沉结构与换热效果研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0323003.
- [6] Chen Yingcong, Wen Shangsheng, Wu Yuxiang. Thermal analysis for LED chip on board package based on plastic radiator without substrate[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823005.
陈颖聪, 文尚胜, 吴玉香. 基于塑料散热器无基板上芯片封装的 LED 热分析[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823005.
- [7] Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022006.
刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022006.
- [8] Chen Haowei, Wen Shangsheng, Ma Bingxu, *et al.* Design of ultra-thin direct-down LED panel with tapered optical elements based on Taguchi method[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(10): 1022003.
陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于 Taguchi 法设计带有圆锥台元件的超薄直下式 LED 平板灯[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 1022003.
- [9] Gao Jianzhong, Lü Jikai, Liu Zhang, *et al.* Study on color improvement of stage lights based on RGBW LED light source[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27(2): 39-42.
高建忠, 吕继凯, 刘 章, 等. 基于 RGBW 四色 LED 光源的舞台灯具光色性能改进研究[J]. 照明工程学报, 2016, 27(2): 39-42.
- [10] Chen Yingcong, Wen Shangsheng, Luo Wanxia, *et al.* Design of LED optical system based on the substrate with freeform surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(9): 2947-2953.
陈颖聪, 文尚胜, 罗婉霞, 等. 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.
- [11] Liu P, Wang H, Wu R, *et al.* Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications[J]. Applied Optics, 2013, 52(17): 3998-4005.
- [12] Liang Dejuan, Lai Liping, Chen Chunyu, *et al.* Research of grazing incidence diffuser with microstructure of double-sided triangular prism arrays[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622005.
梁德娟, 赖丽萍, 陈春玉, 等. 掠射式双面三棱柱阵列微结构扩散板的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622005.
- [13] Tang Shunqing. Colorimetry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
汤顺青. 色度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.
- [14] Silva M M A, Oliveira A L B D, Oliveira-Filho R A, *et al.* Effect of blue/red LED light combination on growth and morphogenesis of *Saccharum officinarum* plantlets in vitro[C]. SPIE, 2014, 8947: 89471X.
- [15] Wang H, Jiang Y P, Yu H J, *et al.* Light quality affects incidence of powdery mildew, expression of defence-related genes and associated metabolism in cucumber plants[J]. European Journal of Plant Pathology, 2010, 127(1): 125-135.
- [16] Jin P, Yao D, Xu F, *et al.* Effect of light on quality and bioactive compounds in postharvest broccoli florets[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 705-709.
- [17] Liu Xiaoying, Xu Zhigang, Chang Taotao, *et al.* Growth and photosynthesis of cherry tomato seedling exposed to different low light of LED light quality[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(4): 725-732.
刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 等. 不同光质 LED 弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(4): 725-732.
- [18] Wang H C, Chiang Y T, Lin C Y, *et al.* All-reflective RGB LED flashlight design for effective color mixing[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4411-4420.
- [19] Moreno I. Illumination uniformity assessment based on human vision[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 4030-4032.
- [20] Sun C C, Moreno I, Lo Y C, *et al.* Collimating lamp with well color mixing of red/green/blue LEDs[J]. Optics Express, 2012, 20(1): A75-A84.
- [21] Liu Zulong, Guo Zhenning, Hu Zhiwei, *et al.* Effect of dimming on LED color temperature and luminous flux[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2013, 34(1): 14-17.
刘祖隆, 郭震宁, 胡志伟, 等. 调光方式对 LED 色温和光通量的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 14-17.

- [22] Song Pengcheng, Wen Shangsheng. A dimming method for LEDs based on three-channel pulse width modulation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015(5): 839-846.
宋鹏程, 文尚胜. 基于三通道脉冲宽度调制的 LED 调光调色[J]. 光电子·激光, 2015(5): 839-846.
- [23] Chen H T, Tan S C, Hui S Y. Color variation reduction of Ga N-based white light-emitting diodes via peak-wavelength stabilization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3709-3719.
- [24] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Research on color mixing based on RGBW-LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0923004.
宋鹏程, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 RGBW 四色 LED 的混光研究[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0923004.
- [25] Yu Jianhua, Chen Riguang, E Lei, *et al.* Experimental study on tunable color temperature white light with high color rendering index[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(3): 395-397.
余建华, 陈日广, 鄂 雷, 等. 可调色温的高显色指数 LED 白光光源的实验研究[J]. 半导体光电, 2014, 35(3): 395-397.