

LED 温室植物生产灯的设计*

徐一清, 付顺华, 吴家森, 郑红平, 周国泉†

(浙江林学院 光电子研究所, 浙江 临安 311300)

摘要: 基于温室植物光合作用和光形态调节原理, 设计了发光二极管 (LED) 温室植物生产灯. 以行、列数各为 8 且每行每列中红、蓝光 LED 间隔均匀排列成方阵, 再在红、蓝光 LED 的间隙处均匀填充数颗远红光 LED 组成一个单元模块. 方案一是采用 4×4 颗远红光 LED, 每行、每列中相邻两远红光 LED 的间距与其它行列中相邻两红光 LED 的间距相等. 方案二是采用 8×8 颗远红光 LED, 每行、每列中相邻两远红光 LED 的间距为其它行列中相邻两红光 LED 间距的一半. 以点光源模型来计算单元模块在照明参考平面上照明区域内的的光照度和光质. 数值计算结果表明: 方案二由于红光与远红光照度之比分布除一边缘外较均匀, 整体值中等便于调节, 而优于方案一.

关键词: 光学设计; 人工光源; 发光二极管

中图分类号: TN312+.8

文献标识码: A

0 引言

光环境是温室气候环境的主导因子. 光不仅是植物进行光合作用的能量源, 也是光形态形成的信号源. 叶绿素是植物执行光合作用的主体. 叶绿素 a 在 640~660 nm 的红光区域有一个强吸收峰; 叶绿素 b 在 430~450 nm 的蓝光区域有一个强吸收峰^[1]. 适当的红光(600~700 nm)与蓝光(400~520 nm)之比即 R/B 才能保证培育出形态健全的植物. 600~700 nm 的红光和 700~800 nm 的远红光之比即 R/FR 对植株高度调节具有重要影响^[2]. 600~700 nm 的红光能降低植物体内赤霉素的含量, 从而减小节间长度和植株高度; 而 700~800 nm 的远红光其作用恰好相反, 能提高赤霉素的含量, 从而增加节间长度和植株高度. 目前农业上常用的温室人工光源有白炽灯、荧光灯和高压钠灯等, 这些人工光源发出的是复合光, 其 R/B 和 R/FR 无法调控. 近年来随着发光二极管 (LED) 技术的飞速发展^[3-5], 其成本越来越低, 低能耗的冷光源 LED 将是未来温室植物生产中的一种主要人工补光源. 当前单颗超高亮度 LED 的发光强度还不足于供给植物正常的生长发育. 但是, 多颗 LED 通过组合设计完全能满足温室植物的光需求. 应用 640 nm 的红光 LED、660 nm 的红光 LED、735 nm 的远红光 LED 和 455 nm 的蓝光 LED 作温室人工光源已成功栽培了萝卜和叶用莴苣^[6-7], 但四种 LED 没有组合在一起, 布置在作物上方的不同位置, LED 的高指向性致使照明区域内的 R/B 和 R/FR 不均匀. 其次, 该光源是通过增加或减少两种不同的红光、蓝光和远红光 LED 的数量来实现调

节光源的 R/B 或 R/FR, 实际操作不方便. 本文是以红光、蓝光和远红光三种 LED 通过设计组合在一起, 来实现照明区域内的 R/B 和 R/FR 尽可能均匀.

1 组合设计

红光 LED 选用的是半值角 7°、直径 5 mm、波长 637 nm、带宽 12 nm、在标准工作电流 10 mA 下发光强度为 23.5 cd 的超高亮度圆灯; 蓝光 LED 是半值角 7°、直径 5 mm、波长 459 nm、带宽 16 nm、在标准工作电流 20 mA 下发光强度为 6 cd 的超高亮度圆灯. 红、蓝光 LED 所能承受的最大正向工作电流分别为 200 mA 和 160 mA. 远红光 LED 为半值角 15°、直径 5 mm、波长 735 nm、带宽 20 nm、在标准工作电流 50 mA 下发光强度为 640 mcd 的圆灯. 由于远红光 LED 的发光强度不大, 故选择的半值角要大一些. 组合设计时, R/B 和 R/FR 的调节是通过改变红、蓝光 LED 的正向工作电流来实现的. 采用模块化概念设计, 以利于安装、更换和拓展之便捷. 由于工程自动控制上最便利使用的方式为方阵, 加上电脑资料常用单位为位元组, 其中一位元组等于八位元, 因而设计阵列式 LED 组合, 以行、列数各为 8 且每行每列中红光 LED 与蓝光 LED 间隔均匀排列成方阵, 再在红、蓝光 LED 的间隙处均匀填充数颗远红光 LED, 组成一个单元模块, 可按需进行纵向和/或横向拼装拓展, 且不改变 R/B 和 R/FR 分布的均匀性. 具体排列成两种形式, 相邻红、蓝光 LED 中心间的距离 L 可调节.

图 1(a) 是 4×4 颗远红光 LED, 每行、每列中相邻两远红光 LED 的间距与其它行列中相邻两红光 LED 或相邻两蓝光 LED 的间距相等, 称方案一. 图 1(a) 中黑的为红光 LED, 白的为蓝光 LED, 灰的为远红

*浙江省科学技术计划项目 (2007C22064) 资助

†Tel: 0571-63740072 Email: zhouguoquan178@sohu.com

收稿日期: 2008-11-04

光 LED. 图 1(b)的是 8×8 颗远红光 LED, 每行、每列中相邻两远红光 LED 的间距为其它行列中相邻两红光 LED 或相邻两蓝光 LED 间距的一半, 为方案二.

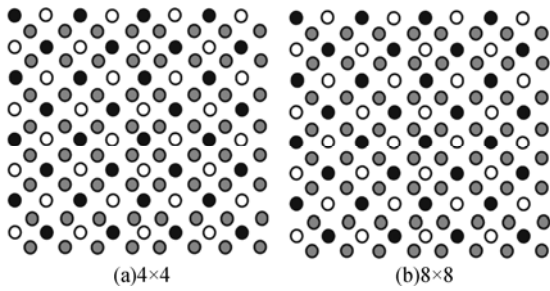


图1 LED组合方案

Fig.1 Schematic diagram of assembled LEDs

为了保证植物栽培面上的光合成有效量子流密度分布均匀, LED 组合单元模块不应距离植株过近. 现以 LED 组合单元模块正下方 10 cm 处作为照明参考平面. LED 的直径为 5 mm, LED 与照明参考平面的垂直间距为 10 cm, 因此每一个 LED 均可视为一个点光源. 照明参考平面上每一点的光照强度可根据点光源之倒平方法则计算得到, 计算步骤为:

1) 应用 LED 光强角度测试仪测量 LED 的发光强度 I 与偏离 LED 正法向角度 θ 间的依赖关系, 对所得数据进行统计回归, 得到红、蓝光 LED 的相对强度-角度回归式为

$$I_q = \frac{0.9618}{1 + 0.04856 \exp(0.4754\theta)} + \frac{63.32}{1 + \exp(1.575\theta)} - 63.22, \quad \theta < 13.2^\circ \quad (1)$$

其中 q 等于 R 或 B, 测量数据与上述回归关系式的相关程度为 $r^2=0.9999$. 远红光 LED 的相对强度-角度回归公式为

$$I_{FR} = -0.08068 + \frac{0.3739}{1 + 10^{0.4711(\theta-14.53)}} + \frac{0.7290}{1 + 10^{0.08506(\theta-17.28)}}, \quad \theta < 28^\circ \quad (2)$$

其中 $r^2=0.9998$.

2) LED 组合单元模块在照明参考平面内的照明面积

$$S = \left[7L + 2h \tan\left(\frac{13.2}{180}\pi\right) \right]^2 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

式中 L 的单位为 cm, $h=10$ cm 为 LED 组合单元模块与照明参考平面间的距离. 当相邻红、蓝光 LED 的间距 L 取 1 cm 时, 光照区域面积 S 大约为 137 cm². 所以, 计算区域取 12 cm×12 cm 的正方形, 并且将此计算区域分割为 100×100 的观察点点阵.

3) 红、蓝和远红光 LED 组合单元模块中每一个 LED 在照明参考平面上均有一个几何投影, 照明参考平面上任一观察点与这 80 个或 128 个几何投影中心的距离 d_j (单位为 cm) 可求得. 照明参考平面上的这一

观察点与 LED 组合单元模块中每一个 LED 的连线和垂直方向所成角度的余弦由直角三角形关系可知为 $(1 + d_j^2/100)^{-1/2}$, 进而确定每一个 LED 相对于这一观察点的视角.

4) 对于每一个观察点, 相应的红、蓝和远红光 LED 对此观察点的照度贡献可依相对强度-角度回归式和点光源之倒平方法则计算

$$E_j = \frac{I_{0j} I_j(i) I_j}{h^2 (1 + d_j^2/100)^{3/2}}, \quad (4)$$

其中, j 等于 R 或 B 或 FR. I_{0j} 分别表示红光或蓝光或远红光 LED 在标准工作电流下的发光强度. $I_j(i)$ 为相应的红光或蓝光或远红光 LED 的发光强度与正向工作电流的依赖关系. 在标准工作电流下, $I_j(i)=1$. 经测量统计, 红光的相对光强与电流关系

$$I_R(i) = 4.479 - 4.528 / \{1 + \exp[(i - 36.56)/21.36]\} \quad (5)$$

其中 $r^2=0.9989$, 电流 i 的范围为 0~100 mA. 蓝光的相对光强与电流关系

$$I_B(i) = 4.938 - 5.691 / \{1 + \exp[(i + 52.50)/42.72]\} \quad (6)$$

其中 $r^2=0.9992$, 电流 i 的范围也为 0~100 mA. 一般 LED 工作电流的使用上限为其最大正向工作电流的 0.7 倍, 但从使用寿命考虑, 红、蓝光 LED 工作电流的使用上限取 100 mA.

5) 分别对所有的红光、蓝光、远红光 LED 在这一观察点的光照强度求和累计

$$E_R = \sum_{j=R} E_j, \quad E_B = \sum_{j=B} E_j, \quad E_{FR} = \sum_{j=FR} E_j \quad (7)$$

三者之和即为该点处的混合光总照度: $E = E_R + E_B + E_{FR}$.

6) 分别计算红光与蓝光的光照强度之比和红光与远红光的光照强度之比

$$R/B = E_R / E_B, \quad R/FR = E_R / E_{FR} \quad (8)$$

7) 对所有 100×100 个观察点进行相同的操作.

2 计算结果

图 2 至图 5 是在标准工作电流下 LED 组合单元模块在照明参考平面上照明区域内的红光照度、蓝光照度、远红光照度、三色混合光照度、R/B 和 R/FR 分布图, 其中 $L=1$ cm. 方案二由于远红光 LED 的颗数较方案一的多, 致使在相同的照明区域内不但其远红光的强度较方案一的大, 而且其远红光的均匀性也较方案一的好. 三色混合光的照度不大, 方案二的最大照度为 12 000 lx; 方案一的最大照度为 10 000 lx. 方案一和方案二的 R/B 分布除边缘外基本均匀一致, 维持在 5.0 左右. 方案一的 R/FR 分布除边缘外中心有起落, 整体的 R/FR 值较大在 20 左右, 不宜调控; 而方案二的 R/FR 分布除一边缘外较均匀, 整体值中等在 4.0 左右, 便于调节. 由于阴性植物需要 500~2 500 lx 的光照射, 中性植物需要 2 500~30 000 lx 的光

照射,所以再增加的 L 值将会进一步减小混合光总照度,不适宜作中性植物的人工光源.因此, L 应取 1 cm. 在 R/B 分布相同的情况下,从 R/FR 调节的角度出发,优先选择方案二. R/B 和 R/FR 的调节过程分两步. 第

一步先调节 R/FR. 需要较大的 R/FR 或较小的 R/FR 是通过调节红光 LED 的工作电流来实现. 第二步先调节 R/B. 在红光 LED 固定的基础上,通过调节蓝光 LED 的工作电流来控制 R/B.

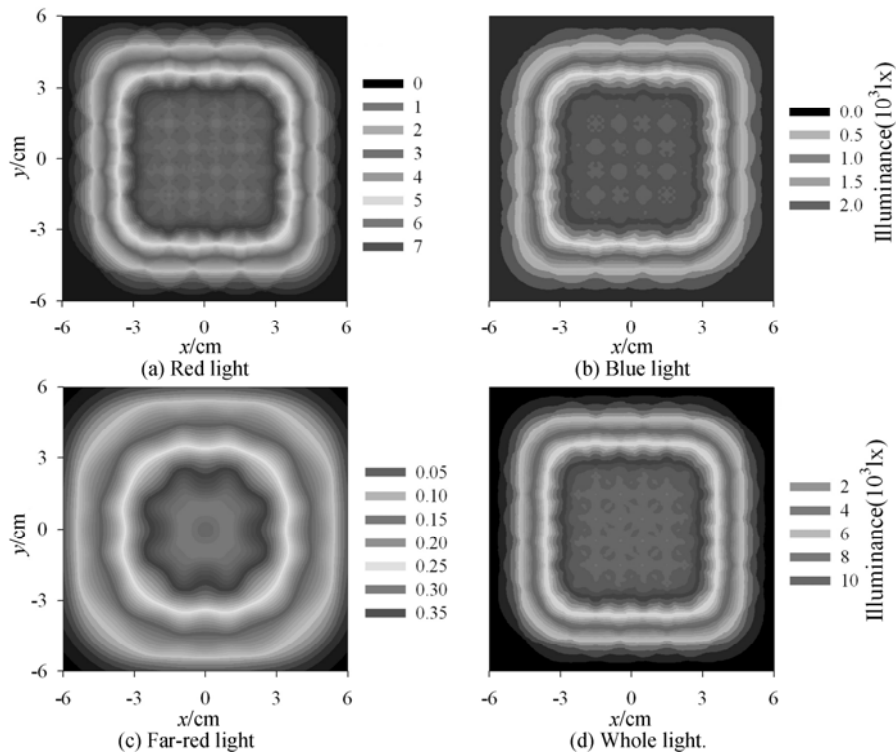


图2 方案一LED组合单元模块下方10 cm处的照度分布

Fig.2 Distribution of illuminance located 10 cm below LEDs arranged with scheme one

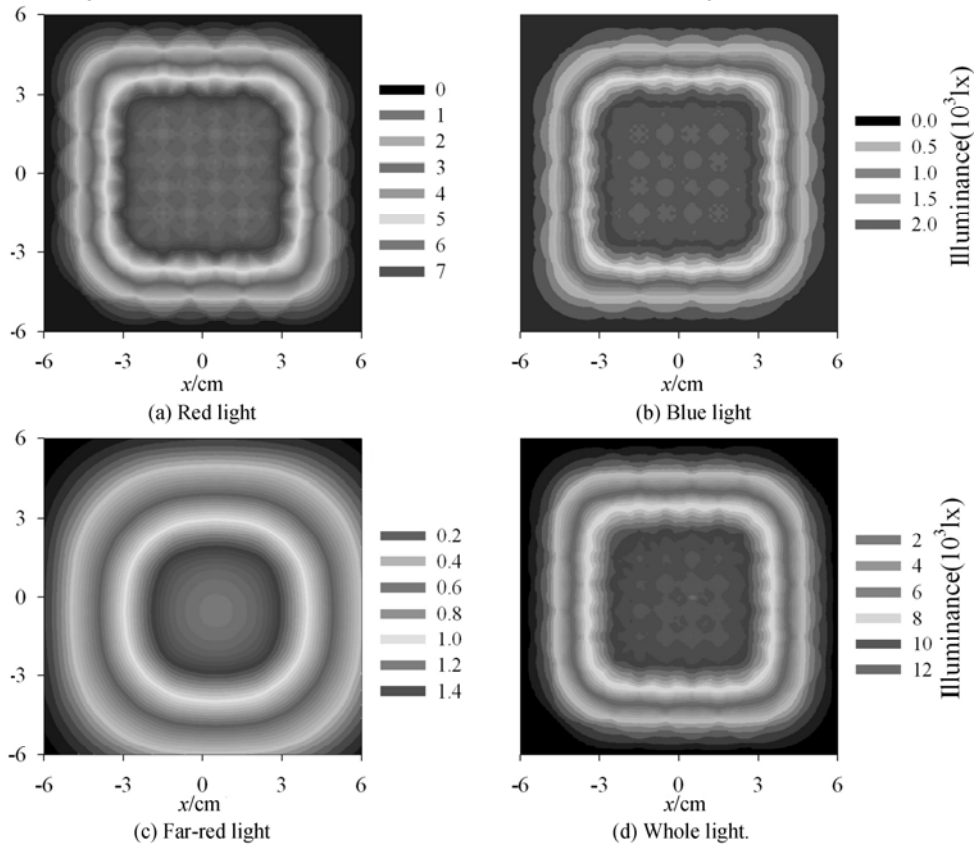


图3 方案二LED组合单元模块下方10 cm处的照度分布

Fig. 3 Distribution of illuminance located 10 cm below LEDs arranged with the second scheme

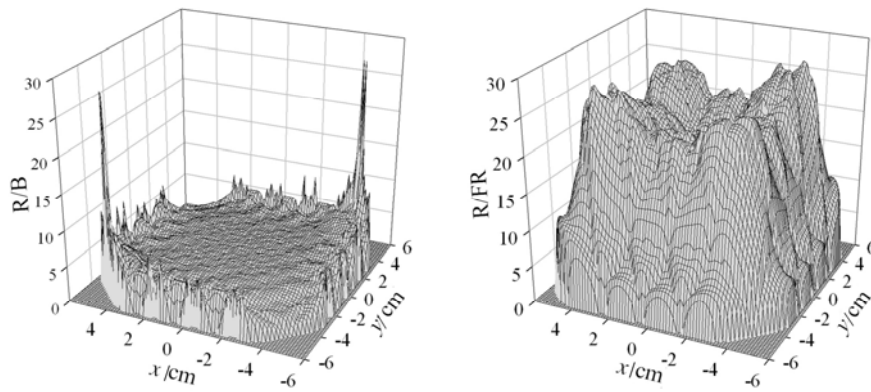


图4 方案一LED组合单元模块下方10 cm处的光质分布

Fig. 4 Distribution of light quality located 10 cm below LEDs arranged with scheme one

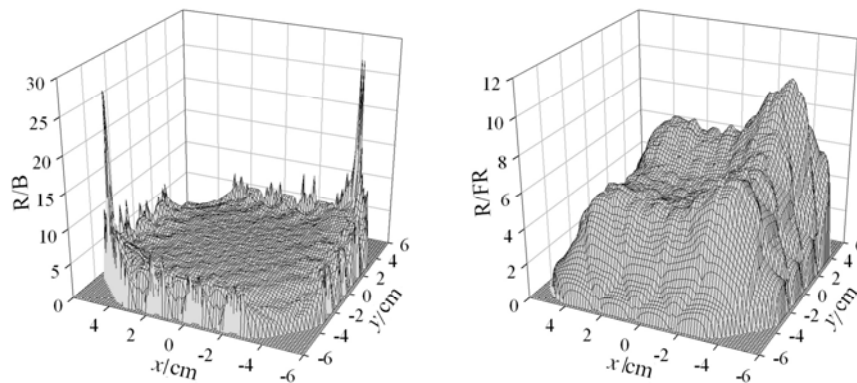


图5 方案二LED组合单元模块下方10 cm处的光质分布

Fig. 5 Distribution of light quality located 10 cm below LEDs arranged with the second scheme

3 结论

基于温室植物光合作用和光形态调节原理,设计了阵列式红、蓝和远红光LED组合,以行、列数各为8且每行每列中红、蓝光LED间隔均匀排列成方阵,再在红、蓝光LED的间隙处均匀填充数颗远红光LED组成一个单元模块,可按需进行纵向和/或横向拼装拓展,且不改变R/B和R/FR分布的均匀性. 方案一是采用4×4颗远红光LED,每行、每列中相邻两远红光LED的间距与其它行列中相邻两红光LED或相邻两蓝光LED的间距相等. 方案二是采8×8颗远红光LED,每行、每列中相邻两远红光LED的间距为其它行列中相邻两红光LED或相邻两蓝光LED间距的一半. 采用点光源模型来计算LED组合单元模块在照明参考平面上照明区域内的红光照度、蓝光照度、远红光照度、三色混合光照度、R/B分布和R/FR分布. 方案二由于R/FR分布除一边外中心较均匀,整体的R/FR值中等便于调节,而优于方案一. 相邻红、蓝光LED中心间的距离 L 取1 cm为宜. R/B和R/FR的调节过程为先调节红光LED的工作电流,再调蓝光LED的工作电流.

参考文献

- [1] PAN Rui-zhi, DONG Yu-de. Plant physiology[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2001. 潘瑞炽, 董愚德. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] LIU Zai-liang, MA Cheng-wei, YANG Qi-chang. Review on controlling the ratio of red light to far-red light in protected environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, **20**(1): 270-273. 刘再亮, 马承伟, 杨其长. 设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2004, **20**(1): 270-273.
- [3] LIU Jiang, LIU Cheng-yi, YANG You-yuan, *et al.* The novel light emitting diode (LED) sources system for animal cell or tissue culture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 151-154. 刘江, 刘承宜, 杨友源, 等. 用于动物细胞和组织培养的新型LED生物光源系列率的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(2): 151-154.
- [4] LI Bing-qian. A new type high power lighting emitting diodes based on MCPCB and its opto-electrical characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 372-374. 李炳乾. 基于金属线路板的新型大功率LED及其光电特性研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 372-374.
- [5] ZHAO Hua-long, LIANG Zhi-yi, SHI Xing-chun, *et al.* The design of LED using in optical projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 244-246. 赵华龙, 梁志毅, 石兴春, 等. 利用LED的投影系统光源设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 244-246.
- [6] TAMULAITIS G, DUCHOVSKIS P, BLIZNIKAS Z, *et al.* High-power LEDs for plant cultivation[C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 165-173.
- [7] TAMULAITIS G, DUCHOVSKIS P, BLIZNIKAS Z, *et al.* High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, **38**: 3182-3187.

Design of LED Light Source for Production of Greenhouse Plant

XU Yi-qing, FU Shun-hua, WU Jia-sen, ZHENG Hong-ping, ZHOU Guo-quan
(Research Institute of Photoelectron, Zhejiang Forestry University, Lin'an, Zhejiang 311300, China)

Received date: 2008-11-04

Abstract: Based on the photosynthesis and photomorphogenesis of greenhouse plant, LED light source was designed for the production of greenhouse plant. A phalanx was adopted. The red and blue LEDs with 8 lines and 8 rows were uniformly and intervallic arranged. The far-red LEDs were filled in-between the red and blue LEDs. There were 4×4 far-red LEDs in the first scheme, and there were 8×8 far-red LEDs in the latter scheme. In both schemes, the expansion of modules in the longitudinal and the transverse directions would not destroy the layout of red, blue, and far-red LEDs. A model of point light source was used to calculate the illuminance and the light quality in the reference plane. The numerical calculations show that the second scheme has an advantage over the first one. The ratio of illuminance of red light and far-red light is relatively uniform in the second scheme. And, the whole value is moderate and convenient to control.

Key words: Optical design; Artificial light source; LED



XU Yi-qing was born in 1980. He graduated from Zhejiang University. Now, he is an engineer of Research Institute of Photoelectron, and his research interests focus on optical design and photoelectron technology.