

基于 LED 的植物组培光源系统的设计与实现

植物组织培养技术已有近百年历史,通过组织培养技术实现重要经济植物工厂化生产的研究方兴未艾。光作为植物生长发育过程中的重要环境因子,也是植物生长的主要能量来源之一。组培室采用人工光源直接给植物补光是促进植物生长的有效途径,而高效节能地对植物补光的理论依据主要是植物对光的选择性吸收。近年来,人们一直在努力模拟植物的吸收光谱,以求研制出某种光源,使其发射光谱最大限度地接近植物的吸收光谱以产生共振吸收,促使光合作用高效进行。

有关植物组织培养人工光源改进工作主要集中在研发较低散热与较高效率的人工光源以降低成本,并且符合植物生长所需。目前,植物组培所采用的人工光源主要是白炽灯、日光灯、钠灯、高压汞灯等,但这些人工光源的发射光谱不能很好地满足植物生长对光的选择性需求,补光效率低,灯管的寿命与发光效率均不够理想,灯管发热需大量耗电,以致整体耗电成本颇高,能耗费用占全部运行成本的 50%~60%。与传统人工光源相比,LED 具有可调整光强及光谱、冷却负荷低、电光转换效率高、体积小、寿命长、使用直流电及可设定特定波长、波长固定等特点,且环保性能佳,对于植物组培是一种非常适合的人工光源。

使用红光与蓝光高亮度 LED 建立可调整光量、光谱、给光频率与工作比的人工光源,需要提供连续无闪烁的光或高频闪烁的光。国外和国内利用 LED 光源的初步研究已证实利用 LED 光源作为温室人工光源能够有效提高植物的生长量和品质。本文以 LED 为基础,设计和开发了植物组培光源系统,并且以珍稀药用植物铁皮石斛为试验材料,对基于 LED 的植物组培系统的实现进行了验证,取得了令人满意的结果。

光源系统设计

1、LED 光源系统的特点

随着 LED 的技术进步,其在各种领域的研究逐渐开展起来。发达国家在这方面的研究工作起步较早,美国、日本、荷兰、俄罗斯等发达国家走在了该领域的前列。美国 Bula 于 1991 年首先使用高亮度 LED 在太空农业的应用研究,开创了 LED 等在农业方面的应用[4];1993 年日本 Nichia 公司发明了蓝光 LED 后,Okamoto 于 1996 年使用高亮度红光 LED 与蓝光 LED,在蓝、红光量子数的比例(B/R)为 1:2 时可培育正常的莴苣[5]。从以上研究结果看,与传统光源相比[9, 10],无论从发光效率,还是光的利用率以及光的可调控性来说,LED 灯在温室人造光源的应用中显示出无可比拟的优势。LED 光源系统的特点主要包括以下几个方面:

(1) 发光效率高日光灯为低压水银荧光灯,它是典型的热阴极弧光放电型低压汞灯。日光灯的发光效率理论值是 20.15%,是白炽灯的 2 倍多。高压钠灯

是利用高压钠蒸气放电，放电时大部分辐射能量集中在共振线上，即 589.0nm 和 589.6nm。选择适当的放电条件可以获得很高的共振辐射效率。从高压钠灯的相对光谱能量分布可知，其发射光谱峰值集中在黄光区，蓝紫光很少，有较多的红光。LED 目前的发光效率可达 50%左右。

(2) 光被植物的利用率高一般白炽灯所发出的光幅射中，可见光不到 10%，而 90%以上是红外线。所以，用此光源对温室大棚作物进行补光，效率低，能源浪费大。从植物照明角度来看，黄光与红光搭配不合理，也不是理想的人工光源。高压汞灯在紫外、可见光和红外区域都有辐射，可见光中黄绿光成分占相当大的比例。但这部分光对植物照明来讲效果不大，所以它也不是理想的人工光源。根据研究，不同绿色植物对光的吸收谱基本相同，在可见区主要集中在 400~460nm 的蓝紫区和 600~700nm 的红橙区，采用红光与蓝光组合的 LED 光源，可实现植物的最大光利用率。

(3) 光的可调控性好采用白炽灯、日光灯、钠灯、高压汞灯等对生物生长性进行研究，无法准备定量控制，也无法按需任意设定定量参数的组合。而采用不同波长的 LED，通过组态可调节的驱动控制电路，可以根据不同植物特征选择不同的光谱和光色组合，获得植物所需的光源，并且能耗和成本比传统电光源低。

(4) 灯具耐频繁启动日光灯寿命一般不少于 3000 小时，其条件是每启动一次连续点燃 3 小时。若启动一次只点燃 1 小时，灯管的寿命缩短到 70%以下，因此，使用日光灯时要尽量避免不合理的频繁启动。LED 产品稳定性极高，不易损坏，减少购买新产品费用，连续进行几百万次的开关操作都不会损坏光源；而节能灯在 5000 次的开关操作就会损坏。

从以上的比较可以看出，LED 灯在植物培养的人造光源的应用中显示了示很好的性能特点。

2、光源系统设计

对于植物组培中的人工光源系统的研究正是该领域当前的研究热点，开展本研究，对于降低设施工厂的照明能耗，提升植物的生长速度和质量具有十分重要的意义。但是目前对于 LED 用在植物生长上的研究还是集中于单灯的概念，没有以系统的思路来开发 LED 光源产品，不能满足不同植物的光需求特性，也不能满足植物不同阶段的光质、光强和光周期的要求。鉴于此，本文研究团队在 2008 年底首次提出“智能化 LED 植物生长光照系统”的概念，并开发了组态化植物生长 LED 光源控制系统，可满足不同植物及其各生长阶段的光质、光强、光周期的光照需求。

控制系统结构框图如图 1 所示。以植物组织培养室的组培架为一控制系统单元，每单元由 1 个主控模块与多个控制终端构成，多层配置 1 个控制终端，主控模块与控制终端采用 RS485 通讯。通过主控模块，可分别对每控制终端进行红光

与蓝光光强、光谱与光周期参数设置，并将这些参数存储到各终端中。终端在日常工作时，通过扫描这些参数要求，构成自己的控制模式，进行相应的驱动输出。

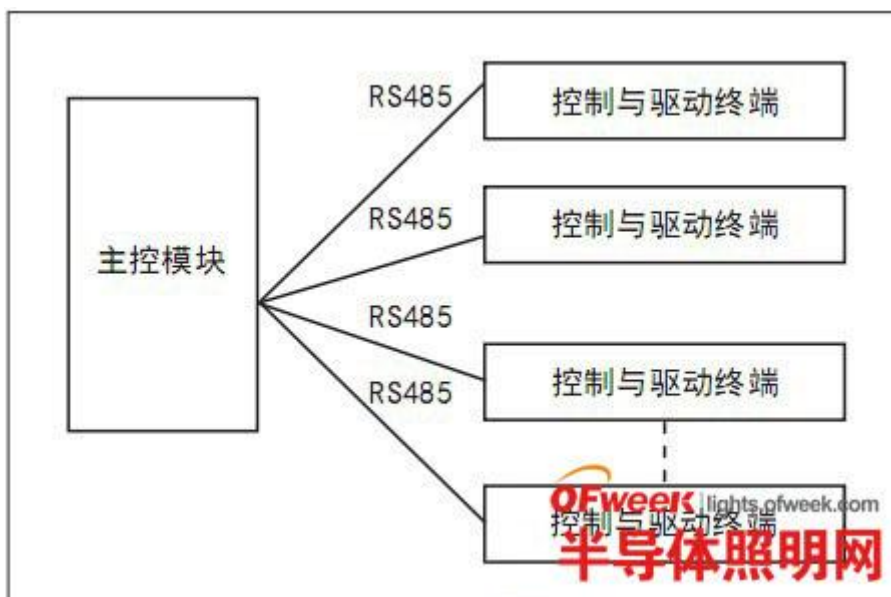


图 1 系统框架图

主控模块的结构框图如图 2 所示。主控模块采用微处理器 MEGA8L 为 MCU，并采用键盘与点阵式液晶作为人机交互界面，主控模块还具有两路串行接口，一路是 RS485 接口与各终端进行通讯，另一路是作为扩展数据输出接口。在后期进行实验数据统计时，还可以通过该接口将终端实验数据传输到 PC 机上。

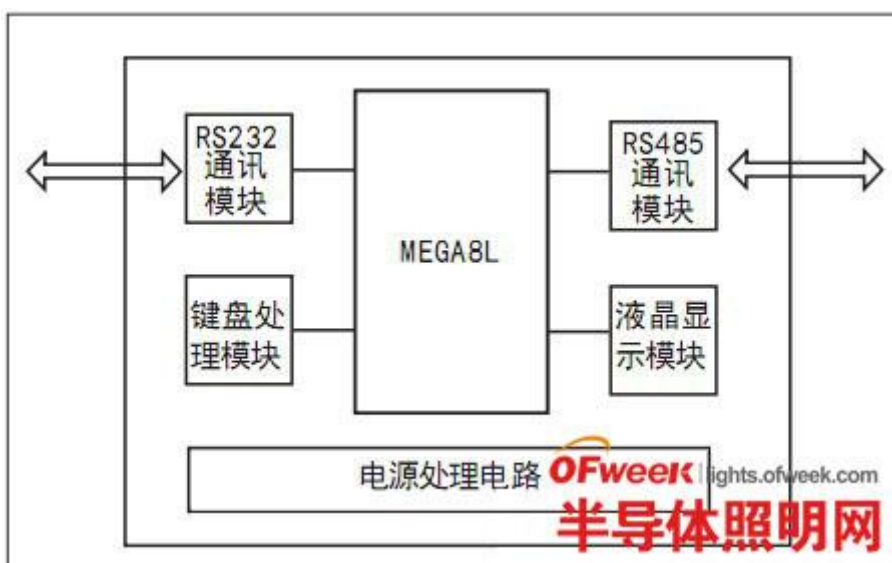


图 2 主控模块框架图

控制终端框图如图 3 所示。控制终端采用微处理器 MEGA8L 为 MCU，通过 RS485 接口与主控模块进行通讯，每一终端都有唯一的组 ID 号。终端输出两路 PWM 波形，分别对应红光驱动与蓝光驱动，PWM 的占空比根据设定的光强参数可进行调节。由于微处理器的 I/O 端口的驱动电流不够，故需在每路 PWM 输出电路后级增加大功率驱动电路。终端还具有实时时钟（RTC），可记录当前实验时间，并将实验起始时间与终止时间记录到片内 E2PROM 中，该实验记录在需要的情况下，可通过 RS485 传回到主控模块，并通过主控模块的 RS232 扩展接口输出到后续处理 PC 机中。

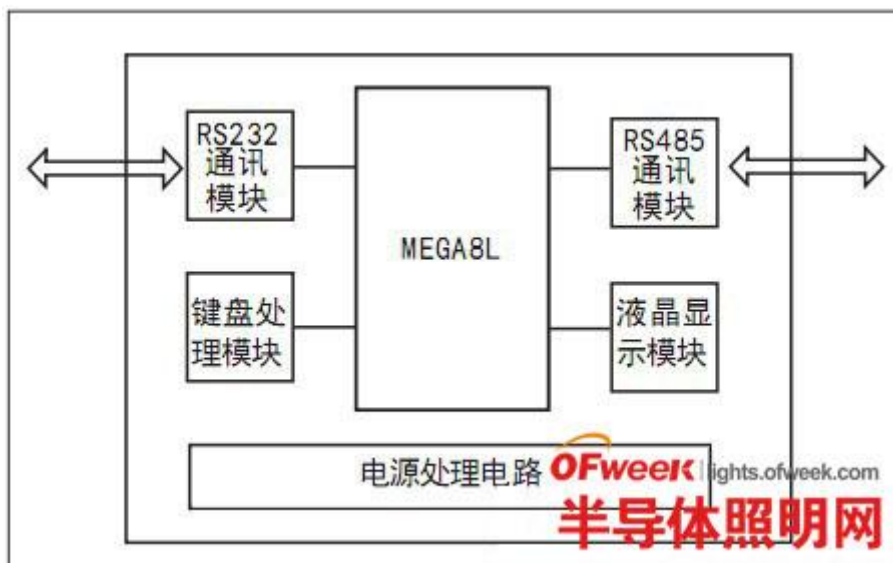


图 3 控制终端框架图

LED 性能稳定，光色分布可选择，耗电量小等优势明显。但在实际应用中，单颗 LED 直接使用是不能满足植物生长需求的，即使是使用更大功率的 LED 也达不到。传统光源的反光罩配光方式一是不适合 LED 光源的发光方式，二是反光罩做成的灯具的效率只能达到 70%，光损失太大。为了达到植物生长要求的光合作用，我们将选用以反光罩和透镜两种方式，或两者结合使用的方式来完成。并且对光波进行严格测试，反复配比论证，以此达到项目要求。

为解决以上问题，设计出与 LED 封装相结合的反光罩和透镜，减少二次光学处理过程中的光损失，同时控制出射角度，一次光学设计以完成透光效率的提高和对整灯配光作用的提高。选用更高折射率的光学材料，采用透镜镀膜技术，可以使光的损失降低到 4% 以下，这也是本项目采用 LED 光源结合配光模块作为光源的原因。采用集成的 LED 光源，可以使整灯的使用寿命加大，能源消耗减少，植物生长加快，具有多重意义。

光源系统的实现与应用

以铁皮石斛为试验材料，以此 LED 的植物组培光源系统为基础，研究了不同光质对铁皮石斛生长特征的影响（如图 4 和表 1）。全部试验均在植物组织培养室中进行，环境温度设为 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 。LED 光源系统的光谱分红光、蓝光及其组合 I（红：蓝=8：2）、组合 II（红：蓝=8：3）共 4 个水平，光强为 $45 \pm 5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，光照时间为每天 14 小时；以普通日光灯作对照，光强为 $45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验用苗基本一致，初始苗高 1.2cm 左右，每种光谱处理 30 株，培养时间为 2009 年 9 月 6 日至 11 月 15 日，测定指标主要包括苗高、茎粗、叶数、平均叶长、平均叶宽、根数、平均根长、干物质含量等。研究表明，红光、红蓝混光 I 和 II 条件下铁皮石斛组培苗株高较高，其苗高数值分别是日光灯条件下的 2.59、2.55 和 1.71 倍；蓝光条件下铁皮石斛组培苗茎粗表现最大，为 0.53cm；从叶片性状看，红光、红蓝混光 I 条件下铁皮石斛组培苗叶片数差异不大且明显多于其它光谱条件，而不同光谱条件下叶长、叶宽数值差异未达显著水平；不同光谱条件下根数也未达显著差异，但红蓝混光 II 条件下的根长数值最大，明显大于红蓝混光 I、蓝光和日光灯条件的相应数值。

另外，对于干物质含量，红光条件下铁皮石斛组培苗表现最小，仅 63.36g/kg，其他 4 种光谱条件下的数值差异未达显著水平。总体来说，相比日光灯，4 种 LED 光谱条件下铁皮石斛组培苗均在某些性状上表现出明显的优势，能够明显促进铁皮石斛的生长和根系的发育，缩短铁皮石斛的生长周期。因此，LED 植物组培光源系统能够作为植物组培苗培育的理想光源。



图 4 不同光谱条件下生长的铁皮石斛组培苗

表 1 光谱对铁皮石斛组培苗生长的影响

光源类型	株高 /cm	茎粗 /cm	叶数 /片	叶长 /cm	叶宽 /cm	根数 /条	根长 /cm	干物质 /g kg ⁻¹
红蓝混光 I	6.93±1.90	0.31±0.05	9.67±1.41	1.47±0.27	0.42±0.06	8.67±2.35	1.77±0.47	141.18±3.57
红蓝混光 II	4.64±0.58	0.42±0.05	7.38±0.74	2.15±0.45	0.57±0.09	7.50±1.77	4.96±1.07	128.60±5.42
红光	7.04±1.51	0.28±0.04	9.23±1.82	2.16±0.67	0.41±0.05	8.20±1.93	3.16±0.95	63.26±2.41
蓝光	3.15±0.63	0.53±0.07	6.55±1.37	1.50±0.26	0.49±0.08	7.45±2.21	2.71±1.14	123.13±4.23
日光灯	2.71±0.34	0.30±0.01	5.80±2.39	1.30±0.46	0.36±0.04	7.75±1.75	3.01±1.10	110.81±3.88

表 1 光谱对铁皮石斛组培苗生长的影响

结语

本文提出了面向植物生长的组态化 LED 光源系统，可满足铁皮石斛、大花蕙兰等重要兰科植物的不同生长时期（包括原球茎诱导、增殖、生长生根以及成花等不同阶段）的光强与光周期需求，光强与光周期参数存入到 E2PROM 中，系统可自行判别植物生长时间，读取 E2PROM 中的参数，进行自动调光。从而提高生长效率，降低植物生长光照能耗和生长成本。