

# 太阳光光纤照明系统在温室中的应用研究

金星

(遵义师范学院 物理与机电工程学院, 贵州 遵义 563002)

**摘 要:**在简要介绍了自动跟踪并采集太阳光的温室补光照明系统的系统结构和工作原理的基础上,详细介绍了太阳光聚光器、太阳光跟踪模块、传光光纤和出光灯具等关键部件的设计,通过试验对温室外和温室内的光照强度进行了对比分析。研究表明,该系统传光率高,节省电能,可为温室内的农作物提供充足的太阳光。

**关键词:**空芯光纤;自动跟踪;太阳光;温室

**中图分类号:**S 625.5<sup>+</sup>2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2015)13-0059-04

温室是一种在寒冷季节进行农作物栽培的生产设施,适宜的温室光照对农作物的生长有很大的促进作用。但是温室采光会受地理位置、季节、天气、日照时间等因素的影响,再加上温室覆盖材料对光线的吸收和反射,以及覆盖材料老化、粘灰、结露等因素,导致温室内的光照强度只有外界光照强度的 70%~80%<sup>[1]</sup>,随着使用时间延长,覆盖材料的透光率还会进一步下降。

光是植物进行物质代谢和能量代谢的基本因素,也是形成温室小气候的主要因素。在现代温室栽培过程中,为充分利用温室空间,获得更高的产量和产值,常采用立体栽培模式,但这种栽培模式将导致矮层农作物光照不足<sup>[2]</sup>。为解决温室光照不足的问题,常采用电光源进行补光,但这种方法需要消耗电能,长期使用势必增加生产成本。

为了避免由于光照不足对温室农作物生长发育造成的不良影响,现采用光纤导光技术为温室农作物进行

补光,以太阳光作为光源,用导光光纤作为传光材料,在传光光纤的出光端面配置出光灯具,以光伏电池为太阳光跟踪模块提供电能,设计新型温室补光照明系统。该照明系统亮度高、光纤柔和均匀,可为温室农作物提供比较充足的照明光线,并达到节约能源的目的。

## 1 总体设计

### 1.1 设计原理

20 世纪 70 年代,光导纤维(简称光纤)作为光缆通信的传输介质被广泛运用,20 世纪 80 年代开始运用到光导照明领域。光纤照明基于光的全反射原理,当光线从入射端面进入光纤后经过数次全反射传输至出射端面。

光纤照明系统以室外自然太阳光作为光源,利用聚光装置将室外的自然光导入光纤,经过光纤传输和出光灯具的二次配光后,把自然光均匀高效地传输并照射到温室内,带来自然光照明的特殊效果。光纤照明相比传统电光源,它可以利用太阳光中对农作物有益的光谱,有效促进农作物的生长发育。由于光纤柔软、重量轻,因此可以引导光纤到达农作物枝叶浓密处和植株下部的叶面,解决立体栽培模式下,农作物复种、间作、套作时矮层农作物光照不足的问题<sup>[3]</sup>。光纤照明系统本身就是用光来“产”光,在照明过程中光电分离,所以安全性得以保障。

**作者简介:**金星(1979-),男,硕士,副教授,现主要从事自动测控及传感器与检测技术的科研与教学工作。E-mail:jinxingpl@163.com.

**基金项目:**贵州省科学技术基金资助项目(黔科合 J 字 LKZS [2014]11 号);贵州省省级重点学科资助项目(黔学位办[2013]18 号);贵州省教育厅产学研基地资助项目(黔教合 KY 字[2013]127 号)。

**收稿日期:**2015-01-19

连续使用 2 次。细菌性褐斑病、软腐病发生时用 20%噻菌铜悬浮剂 600 倍液或 33.3%喹啉铜悬浮剂 800 倍液等喷雾进行防治,每 5 d 喷 1 次,连续使用 2~3 次。

### 6.2 虫害防治

茄子害虫主要有叶螨、蓟马、蚜虫、白粉虱等,春秋季节数量较多、冬季数量少,棚室内可以通过使用防虫

网、悬挂黄色和蓝色粘虫板及使用捕食螨等来降低虫口数量,还可以通过喷施 43%联苯腈酯悬浮剂 2 000~3 000 倍液、阿维菌素 2 000 倍液等防治叶螨,用 10%吡虫啉可湿性粉剂 1 500~2 000 倍液、25%噻虫嗪水分散粒剂 7 500 倍液等防治蓟马、蚜虫、白粉虱,每 5~7 d 喷 1 次,连续喷 2~3 次。

## 1.2 总体设计

图 1、2 为光纤照明系统的原理框图和示意图。从整体结构上看,该照明系统由太阳光聚光器、太阳光跟踪模块、光伏发电模块、端面发光光纤(传光光纤)、出光灯具及耦合装置等部分组成。在白天阳光充足时,太阳光聚光器采集温室外太阳光,将低密度的太阳光汇聚成为高密度的光斑,通过耦合装置与传光光纤进行耦合,传光光纤将太阳光传输到温室内并与出光灯具耦合,出光灯具对接收到的光线进行二次配光,则可实现传光光纤的室内发光照明。同时,该系统设计新型太阳光跟踪模块自动追随太阳,实现最大限度捕捉太阳光;将锂离子电池作为储能装置为太阳光跟踪模块提供电能,利用光伏发电模块为储能装置充电,达到节约能源的目的。

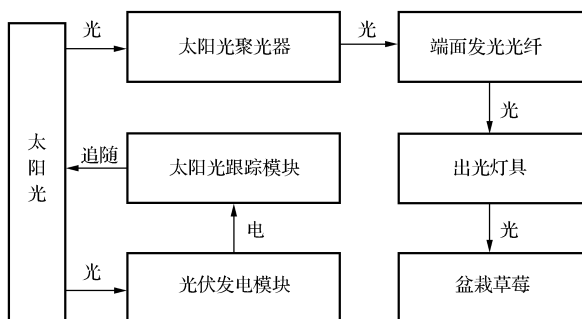


图 1 光纤导光照明系统原理框

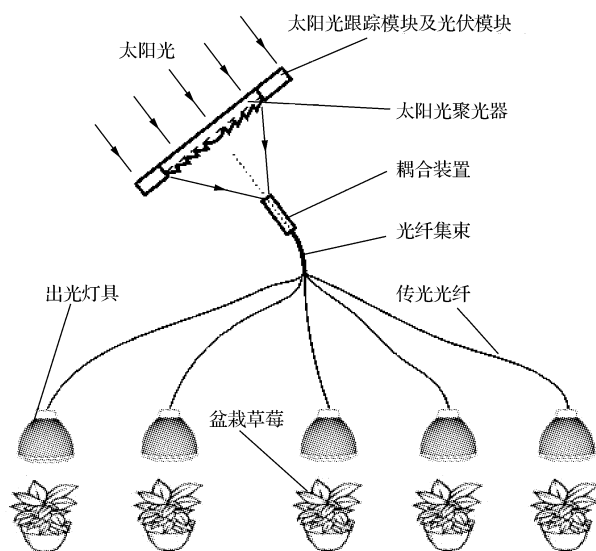


图 2 光纤导光照明示意

## 2 关键部件设计

### 2.1 太阳光聚光器

太阳能是分布最广、储量最丰富的可再生能源,但其也存在着能量密度小、光照强度随时间不断变化的问题。为了提高太阳光的能量密度和利用效率,利用太阳光聚光器收集室外太阳光,并将收集到的太阳光聚焦成

一个高密度小光斑,然后耦合进入光纤。太阳光聚光器按其聚光的方式可以分为透射式聚光器和反射式聚光器,目前应用于高倍聚焦太阳光的聚光器一般为透射式聚光器,在透射式聚光器中又以菲涅尔聚光器应用最为广泛<sup>[4]</sup>。菲涅尔聚光器使用由多个同轴排列或平行排列的棱镜所形成的一序列不连续曲面替代凸透镜或凹透镜的曲面,减小透镜厚度,从而节约了材料和器件的安装空间,由于其质量轻、结构紧凑、透光率高而广泛应用于太阳光聚光领域。

该照明系统太阳光聚光器材料选用 PMMA(折射率 1.49,极限透过率 92.4%),具有良好的透明性、化学稳定性和耐候性。如图 2、3 所示,设计等厚型平板菲涅尔透镜,其光面朝太阳光,单镜有效通光面积为 230 mm×230 mm、环距为 1 mm、焦距为 248 mm、最小焦斑直径为 7.5 mm,当接受面处在光轴 248 mm 处时透镜效率达 85%<sup>[4]</sup>,6 块菲涅尔透镜按 2×3 阵列分布,其有效采光面积为  $S_1 = 0.23 \times 0.23 \times 6 = 0.3174 \text{ m}^2$ 。

根据长江中下游地区日照情况,取太阳光平均地面照度为  $E = 10^5 \text{ lx}$ ,则聚光器采集到太阳光的光通量为  $= 26979 \text{ lm}$ 。

### 2.2 太阳光跟踪模块

目前太阳光跟踪方式分为被动式和主动式 2 种。被动式采光系统的太阳光聚光器固定不动,根据太阳的运动轨迹,需要安装多个聚光器来收集太阳光,因此存在采光效率低等弊端。主动式采光系统采用自动跟踪系统,通过电机驱动调整太阳光聚光器的角度,使得聚光器的光轴始终平行于太阳入射光线,达到高效采集太阳光的目的。常见的主动式自动跟踪系统主要采用以下几种技术方案:通过计算机程序控制跟踪太阳,跟踪精度高,但成本昂贵;时钟式结构跟踪,实现方式简单,但存在累计误差;利用 GPS 定位技术跟踪,跟踪精度高,但天气、建筑物遮挡、电磁干扰等因素会对其信号强度产生影响。

该系统太阳光跟踪模块采用“遮光法”实现对太阳的自动追随,具有跟踪精度较高、结构简单等特点。太阳光跟踪模块由光电传感器、遮光板、驱动电机、行程开关及相关控制电路构成。光电传感器、遮光板、太阳光聚光器、太阳能电池板固定在安装板上,其示意如图 3 所示。当太阳光照射到遮光板 1 和遮光板 2 时,在安装板上会产生阴影,只有当光电传感器 1 和光电传感器 2 同时被遮光板 1 和遮光板 2 的阴影完全遮住时,说明安装板正对太阳光。如果遮光板 1 的阴影没有遮住光电传感器 1,说明在俯仰方向上太阳光没有直射安装板,光电传感器 1 受到太阳光照射,向控制电路输出高电平,接通继电器,启动俯仰驱动电机;如果遮光板 1 的阴影完全遮住光电传感器 1,光电传感器 1 失光,并向控制电

路输出低电平,断开继电器,俯仰驱动电机停止转动,说明安装板在俯仰方向达到太阳直射。如果遮光板2的阴影没有遮住光电传感器2,说明在水平方向上太阳光没有直射安装板,光电传感器2受到太阳光照射,向控制电路输出高电平,接通继电器,启动水平驱动电机;如

果遮光板2的阴影完全遮住光电传感器2,光电传感器2失光,并向控制电路输出低电平,断开继电器,水平驱动电机停止转动,说明安装板在水平方向达到太阳直射。行程开关的作用是用来判断太阳光跟踪模块的极限位置,防止电机过载损坏。

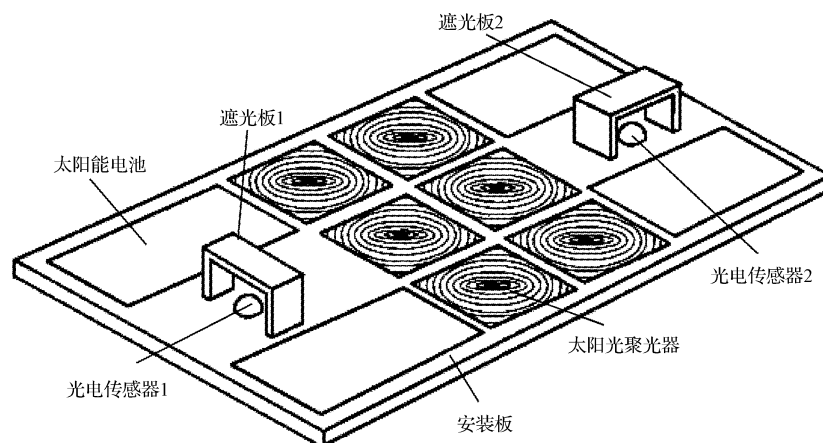


图3 太阳光跟踪模块及光伏系统示意

### 2.3 传光光纤

在太阳光光纤照明系统中,光纤的传输效率是整个光纤传输系统的关键,可采用的光纤种类包括实芯光纤和空芯光纤,其中实芯光纤包括聚合物光纤(POF)、石英光纤、多组分玻璃光纤、液芯光纤等。由于实芯光纤存在芯径小、长时间传输稳定性不高等问题,因此该系统采用空芯光纤来作为传光光纤。

为了提高采光效率,传光光纤采用空芯光纤来传导太阳光。如图4所示,空芯光纤的基管为石英管,为提高反射率、降低传输损耗,在基管内壁先镀一层高反射率金属银膜,银膜厚度 $1\mu\text{m}$ ,再镀一层厚度为 $80\text{ nm}$ 的PMMA电介质膜;基管外壁涂覆柔韧性较好的聚丙烯酸树脂作为保护皮层;空芯光纤能够在 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ 温度范围内连续稳定工作 $30\text{ d}$ ,光学性质无损失。单根空芯光纤长度 $5\text{ m}$ ,有效导光直径 $8\text{ mm}$ ,含保护皮层实际外径 $10\text{ mm}$ ,数值孔径(NA) $0.65\sim 0.66$ ,损耗系数。为保证光纤结构完整性,采用 $N=6$ 根空心光纤紧密排列成光纤束,并用灰黑色耐高温的阻燃塑料作为光纤束保护套管。

为保证将采集到的太阳光高效地耦合进入光纤,在每根空芯光纤的入射端安装玻璃耦合透镜(圆柱形自聚焦透镜,截面直径 $10\text{ mm}$ ,轴向长度 $5\text{ mm}$ ,透光率 $\geq 91\%$ ,耦合效率为 $85\%$ ),要求入射光平行于光纤入射端面法线,耦合透镜的光轴与入射端面法线重合,光纤入射端面位于聚光器焦平面处。

太阳光进入空芯光纤的光通量为 $22\,932\text{ lm}$ ,进入每根空芯光纤的光通量为 $F_3 = F_2 / N = 3\,822\text{ lm}$ 。经过长度 $5\text{ m}$ 的传播后,到达空芯光纤出光端面的光通量为

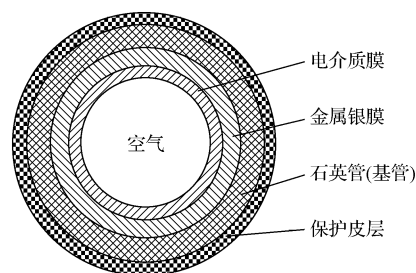


图4 空芯光纤截面结构示意图

$2\,809.2\text{ lm}$ 。

### 2.4 出光灯具

由于单根传光光纤出光端发出的光是一个点光源,为了提高光照质量,需合理地对其进行二次配光。如图5所示,优化搭配锥形反光腔与菲涅尔透镜的组合,以获得最佳的配光效率。锥形反光腔(深度 $60\text{ mm}$ ,基圆直径 $10\text{ mm}$ ,顶圆直径 $60\text{ mm}$ ,反光面反射率 $94\%$ )主要起提高配光效率的作用,菲涅尔透镜(直径 $60\text{ mm}$ ,厚度 $4\text{ mm}$ ,焦距 $40\text{ mm}$ ,环距 $0.5\text{ mm}$ ,材质PMMA)主要起调节光斑大小和照度分布的作用,光纤的出射端面位于菲涅尔透镜的焦点位置,出光灯具竖直向下照射。

出光灯具整体配光效率为 $86\%$ ,照明均匀度为 $67\%$ ,距离透镜 $0.4\text{ m}$ 处光斑直径 $340\text{ mm}$ ,出光灯具出射光的光通量为 $2\,415.9\text{ lm}$ ,距离透镜 $0.4\text{ m}$ 处的光照强度为 $26\,622.7\text{ lx}$ 。

## 3 方法与结果

为了获得更高的草莓产量,常在温室中采用立体化

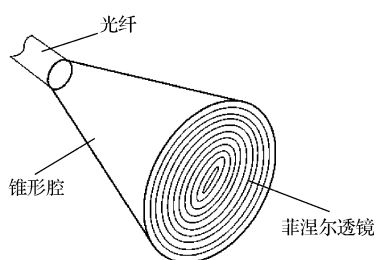


图5 出光灯具结构示意图

栽培技术。由于顶层草莓枝叶的遮挡,使得下层草莓得不到充足的光照,导致下层草莓的产量受到影响。该试验利用光纤照明系统为下层草莓进行补光照明。

### 3.1 试验方法

在温室中放置钢制栽培架,栽培架总共3层,每层层高0.5 m,每层放置7盆盆栽草莓,盆间距0.6 m。按从上到下的顺序,第1层盆栽草莓利用温室屋顶照射下来的自然光照明;第2层盆栽草莓也利用温室屋顶照射下来的自然光照明,但被第1层草莓枝叶遮挡了部分照明光线;第3层盆栽草莓采用太阳光光纤照明系统进行补光照明,出光灯具距离草莓顶层枝叶0.4 m,竖直向下照射。使用照度计(型号:希玛 AS813)在距离草莓顶层枝叶5 cm处进行测量,光线垂直照射照度计感光探头,分别测量每盆草莓顶层枝叶处的光照强度值,求出每层草莓所受光照强度的平均值,数据对比曲线如图6所示。

### 3.2 试验结果

从图6可以看出,受温室覆盖材料的影响,第1层草莓所受光照强度不及室外光照强度的50%,第2层草莓被第1层草莓遮挡,其光照强度有所下降,第3层草莓采用太阳光光纤照明系统进行补光照明,其光照强度超过其它2层草莓的光照强度。由于草莓的光照强度饱

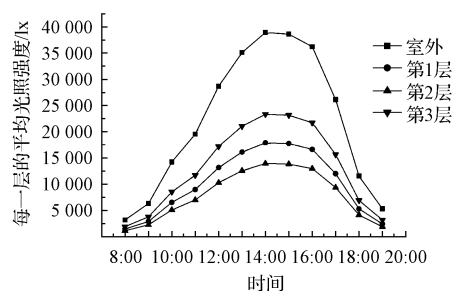


图6 每层草莓平均光照强度对比曲线

和点大约为20 000~30 000 lx<sup>[5]</sup>,通过试验数据可以看出,该系统达到设计目标。

## 4 结论

该试验设计的太阳光光纤照明系统为温室立体栽培模式下低层作物光照不足的情况提供了一种解决方案,并通过试验验证了该方案的可行性。该照明系统利用太阳能光伏电池为自身提供能源,节能环保;在使用过程中光电分离,具有较高的设备安全性;采用“遮光法”对太阳自动追踪,精度高、结构简单。我国是农业大国,温室生产是农业生产的支柱产业之一,把太阳光光纤照明应用于温室补光照明,对提高温室的生产效率有较好的促进作用,具有较好的推广价值。

### 参考文献

- [1] 赵伟华. 日光温室内的光温条件及调控[J]. 北方园艺, 2005(4): 29.
- [2] 陈宗玲, 刘鹏, 张斌, 等. 立体栽培模式草莓的光温效应及其对光合的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011(1): 42-48.
- [3] 李天华, 李海亮. 光纤集光照明系统在温室中的应用研究[J]. 农机化研究, 2012(7): 204-206.
- [4] 吴贺利. 菲涅尔太阳能聚光器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 30-40.
- [5] 董静, 张运涛, 王桂霞, 等. 日光温室草莓立体栽培研究[J]. 北方园艺, 2011(4): 71-73.

## Application of Sunlight Optical Fiber Lighting System in the Greenhouse Lighting

JIN Xing

(Physics and Mechanical and Electrical Engineering Institution, Zunyi Normal College, Zunyi, Guizhou 563002)

**Abstract:** The structure and working principle of supplementary lighting system for greenhouse were briefly introduced; this lighting system could track and collect sunlight automatically. The design of the sunlight condenser, sunlight tracking module, optic transmission fiber and luminaire were described in detail; meanwhile, the light intensity between inside and outside of greenhouse was experimentally investigated. The results showed that this lighting system had the advantages of high light transfer rate and low electric energy consumption, which could provide ample amount of sunlight for crops planted in greenhouse.

**Keywords:** hollow fiber; automatic tracking; sunlight; greenhouse