

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.053

基于叶绿素荧光传感器的植物LED补光测控系统

王纪章 贺通 周静 顾容榕 李永

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对目前温室植物补光无法针对植物生长状况实时反馈控制的问题,以LED补光系统为基础,设计了基于FluorMonitor叶绿素荧光传感器的植物补光测控系统。通过SDI-12和MODBUS通信协议实现对叶绿素荧光参数和光温参数的采集;并根据叶绿素荧光参数 F_t 、 F_m 、光化学量子效率Yield的测量流程和采集周期,设计了自动采集模式和手动采集模式;通过PWM调光模块的设计,完成对LED发光强度的精确调控;通过设计人机接口,实现了对光温参数和叶绿素荧光参数的显示和人机交互操作。以生菜为研究对象,进行了不同调光方式的补光调控试验,试验结果表明,基于叶绿素荧光的LED补光控制系统可以实现对光强、ETR和Yield的稳定控制,增加生菜对光能的利用效率,实现了基于作物生理信息的反馈控制。

关键词: 叶绿素荧光; 补光; 测控系统; LED; 传感器

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0347-06

LED Lighting Control System for Plant Based on Chlorophyll Fluorescence Sensor

WANG Jizhang HE Tong ZHOU Jing GU Rongrong LI Yong

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to realize real-time feedback control for plant supplementary lighting based on the plant growth status, the LED lighting control system based on the FluorMonitor chlorophyll fluorescence sensor was designed. By the SDI-12 and MODBUS communication protocols, the parameters of chlorophyll fluorescence, light intensity and temperature acquisition were realized. According to the measurement process and acquisition cycle of chlorophyll fluorescence parameters of F_t , F_m and Yield, the automatic acquisition mode and manual acquisition mode were designed. Using the pulse-width modulation (PWM) control mode, the LED light intensity control model was designed to realize the plant lighting accuracy control, and the display of light, temperature and chlorophyll fluorescence parameters and human-computer interaction were realized through the design of man-machine interface. The supplementary lighting control experiment for lettuce was carried out. The results showed that the LED lighting control system based on chlorophyll fluorescence sensor can realize the stable control of light intensity, ETR and Yield. The system can improve the light utilization efficiency of lettuce, and the lighting real-time feedback control based on plant growth status was realized.

Key words: chlorophyll fluorescence; supplementary lighting; control system; LED; sensor

0 引言

光是植物光合作用和生长发育的重要调节因子。随着现代设施农业尤其是植物工厂技术的发展,植物补光技术成为设施农业生长环境调控的一

个重要调控手段。据统计,在完全人工光型植物工厂中,补光消耗的能耗占总能耗的40%^[1]。近年来在补光方面的研究主要集中在两方面:①如何提高光源的发光效率,如温室中常采用高光效的高压钠灯(HPS)和发光二极管(LED)作为发光光源,发光

收稿日期:2019-04-20 修回日期:2019-05-28

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA416002)、江苏省重点研发计划项目(BE2018321)、中国博士后基金项目(2015M580400)、江苏省博士后基金项目(1501112B)和江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王纪章(1981—),男,副研究员,博士,主要从事设施农业信息技术研究,E-mail: whxh@ujs.edu.cn

效率可以达到 $1.6 \sim 1.7 \mu\text{mol}/\text{J}$, 而改进 LED 技术已经使 LED 发光效率达到 $2.4 \mu\text{mol}/\text{J}^{[2-3]}$ 。②如何提高作物对光照的利用效率, 目前这方面的研究主要集中在不同光照强度、光质、光周期对作物生长的影响^[4]。为充分发挥 LED 光源的特性, 开发可以智能调控 LED 光源光强和光质的自动补光控制系统, 不仅可以为植物提供最适宜的光环境, 而且可以达到节能的目的。张海辉等^[5-6]开发了可以自由改变红蓝光配比和光强的 LED 自动补光控制系统; 刘晓英等^[7]开发了一种全光谱可调的 LED 调光控制系统, 光谱从远红光到紫外光都可以调节; 赵启蒙等^[8]开发了可变光质的 LED 补光控制照明系统, 利用叶绿素吸收光谱的峰值调节 LED 红蓝光的波长; 胡瑾等^[9]设计了一种通过 PWM 调光的 LED 补光系统; Li 等^[10]开发了一种基于环境条件的 LED 光源模块, 结合植物不同生长阶段以及检测到的环境湿度、温度以及光照等信息, 自动改变 RGB 芯片的配光设置, 从而满足植物工厂对补光照明环境的需求; IERSEL 等^[11]以节能补光为目标, 开发了基于环境光照的 LED 自适应补光控制系统, 以保证作物生长光照强度。

目前叶绿素荧光技术主要监测作物生长信息, 如水分、营养、光照、农药、病虫害、温度^[11-12], 是研究植物光合生理的一个重要手段。许多学者利用叶绿素荧光参数研究了温室环境参数的响应规律^[13-20]。

基于叶绿素荧光的补光控制系统已经得到应用, 但是其叶绿素荧光主要通过现有的叶绿素荧光监测设备 Mini-PAM 实现参数测量, 无法用于实际生产。本文采用 FluorMonitor 叶绿素荧光传感器设计基于叶绿素荧光传感器的植物补光控制系统, 以期实现植物补光的实时动态反馈控制。

1 系统架构

基于叶绿素荧光的 LED 补光测控系统是根据植物对光量实际需求进行精确补光。选取可以表征植物生长状况的叶绿素荧光参数和光照强度、温度等环境参数, 并实时采集参数。选用叶绿素荧光传感器, 实时监测和显示叶绿素荧光数据, 利用按键和液晶显示进行人机交互, 通过 PWM 调光方式实现对 LED 光照强度的控制。补光系统架构如图 1 所示。

系统主要包括: ①主控模块: 用于对获取的传感器数据计算转换, 通过控制算法控制 LED 的亮度。②传感器采集模块: 包括温度、照度以及叶绿素荧光参数的采集。③通信模块: 主要实现单片机 MCU 和

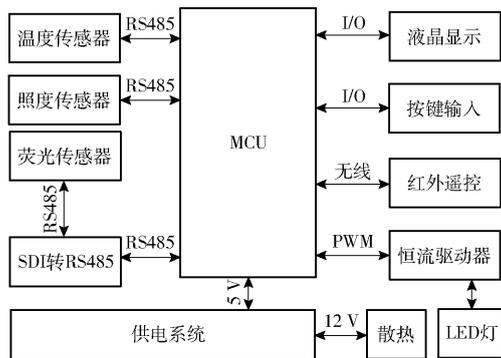


图 1 系统架构

Fig. 1 System structure

传感器以及恒流控制芯片之间的通讯, 包括并行 IO 口通讯、RS485 串口通讯、SDI-12 通讯。④LED 调光模块: 包括 PWM 脉冲发生器、恒流驱动以及 LED 光源。⑤人机交互模块: 包括液晶屏触摸显示和按键操作等。

2 硬件系统设计

2.1 控制芯片选型

STM32F407ZGT6 为 STM32 单片机的核心芯片, 芯片集成了 DSP 和 FPU 指令, 存储内存为 1 024 kB FLASH、192 kB SRAM, 并具有 12 个 16 位定时器, 以及 6 个串口、3 个 12 位的 ADC、2 个 12 位的 DAC、112 个通用 I/O 口等^[21]。

2.2 通信传输模块

系统数据主要包括温度、光照环境参数、叶绿素荧光等传感器采集的数据和 PWM 调光驱动模块传输的控制信号, 系统采用总线式通信架构, 其结构如图 2 所示。

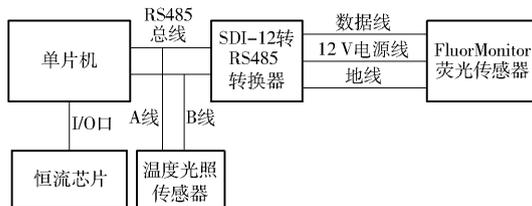


图 2 通信总线

Fig. 2 Communication bus

(1) SDI-12 通讯

由于 FluorMonitor 叶绿素荧光传感器的软件为 SDI-12 通讯协议, 需通过 SDI-12 转 RS485 转换器把叶绿素荧光传感器连接到 RS485 总线, 利用 RS485 总线给 SDI-12 传感器发送指令。

(2) RS485 串口通讯

由于温度和光照传感器为 Modbus 通讯协议, 为实现单片机和环境信息模块的通讯, 采用 RS485 通信模块扩展串口, 选择 SP485 芯片, RS485 串口和单片机串口 2 连接。

(3) I/O 口通信

为了使 I/O 口输出 PWM 波形,对相应 I/O 进行设置:配置 I/O 为推挽复用输出模式,输出频率为 50 MHz,另外需对 AHB1 总线进行输出使能。

2.3 叶绿素荧光参数的采集

采用由澳大利亚悉尼大学研制的高性价比叶绿素荧光传感器 FluorMonitor,该传感器属于调制荧光,测量光的光强小于 $1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,饱和光的最大光强为 $7\,800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,FluorMonitor 叶绿素荧光传感器由 IP65 级别长期监测探头、光纤和叶夹支架、10 m 长线缆、SDI-12 数据线等组成,叶绿素荧光传感器如图 3 所示。



图 3 FluorMonitor 荧光传感器

Fig. 3 FluorMonitor chlorophyll fluorescence sensor

1. 光纤 2. 叶夹 3. 荧光监测探头

该叶绿素荧光传感器具有如下特点:①可以实现无人值守长期连续监测。②同时适用于水生和陆生植物。③属于调制荧光仪,可以进行野外测量、避免了太阳光的干扰。④检测探头可以扩展,1~60 个可选。

FluorMonitor 叶绿素荧光传感器的地线和单片机以及 RS485 的地线相连接,SDI-12 数据线为三态传输线,包含 0、1 和不确定 3 种状态,电源为 12 V。

2.4 LED 调光模块的设计

LED 调光模块结构如图 4 所示。

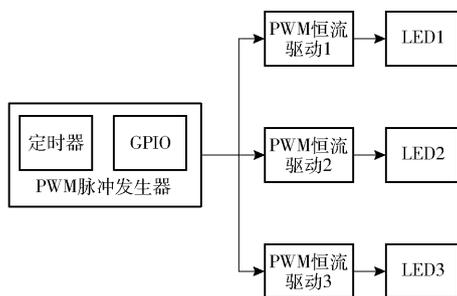


图 4 LED 调光模块结构图

Fig. 4 Structure diagram of LED lighting control module

(1) PWM 脉冲发生器

采用 STM32F4 单片机的 TIM14 通用定时器的通道 CH1 来产生 PWM 输出,包括捕获/比较模式寄

存器(TIM14_CC - MR1/2)、捕获/比较使能寄存器(TIM14_CCER)、捕获/比较寄存器(TIMx_CCR1)。设置捕获/比较模式寄存器(TIM14_CC - MR1/2)的 CC1S 位为 0 表示输出模式,OC1M 位为 110 表示 PWM 模式。

(2) LED 光源选择

采用 Cree 生产的 Lamp XP - E 型 LED 灯珠用于植物补光,该 LED 符合 RoHS 与 Reach 规范,具有热点分离、寿命长、光效好等特点。选用红蓝大功率 LED 灯珠,红光 LED 正向电压为 2.2 V,蓝光正向电压为 3.4 V,电流选用 700 mA。根据生菜生长的需求,设置红蓝光的比例为 2:1^[22]。

(3) 恒流驱动芯片

MT7201C+ 是一款连续工作的降压型恒流驱动芯片,可以驱动一颗或者多颗串联的 LED 灯珠,输入电压 6~50 V,输出电流最大可达 1 A,其 ADJ 引脚可以接受 PWM 调光,PWM 调光频率可达 1 MHz,并且自带 PWM 滤波器,可以更好地实现对 PWM 波形的接收。

2.5 人机交互设计

通过设计矩阵键盘为 4 个按键实现主要传感器校准和参数设定功能。选用 2.8 英寸的 TFTLCD 液晶显示屏作为本系统的显示与触摸控制的人机交互模块,液晶显示屏的分辨率为 320 像素 × 240 像素,支持 25 K 色。通过触摸屏实现叶绿素荧光传感器功能号的选择、工作模式、手动控制调节、参数设定等操作。

3 软件设计

3.1 软件系统架构

系统主要模块包括人机交互模块、采集及控制模型模块、通信模块,相应系统功能分为:按键功能、LCD 显示、通信任务、参数设定、LED 控制等。系统软件的主要模块及其功能如图 5 所示。

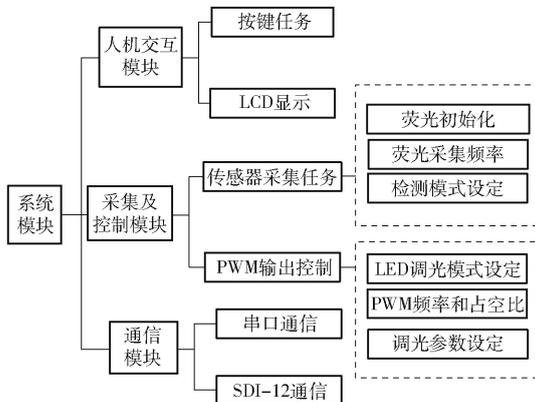


图 5 软件架构

Fig. 5 Software architecture

3.2 软件功能模块

(1) 按键功能

按键功能负责循环检测按键输入。通过按键输入,用户可以设定系统工作模式及参数,为了方便使用,此任务优先级最高,每当有新的输入时,系统必须第一时间做出响应。

(2) LCD 显示

本功能主要是实时更新 LCD 的显示内容,显示系统的最新工作状态。显示内容包括各个传感器的检测输入、按键输入、工作模式及参数设定等。界面设计主要包括环境参数、叶绿素荧光参数的显示,以及叶绿素荧光的测量和 LED 的调节控制。在环境参数和叶绿素荧光参数显示界面,能显示温度、光照以及叶绿素荧光参数的信息。在 LED 调控界面,需要根据叶绿素荧光参数调节 LED 占空比,以此调节 LED 的亮度;LED 调控和叶绿素荧光参数的测量都包括手动模式和自动模式。环境参数及叶绿素荧光参数的测量结果界面如图 6 所示。



图 6 测量结果界面

Fig. 6 Measurement result interface

(3) 通信传输

此功能负责单片机和传感器之间的通信及单片机和 PC 之间的通信。通信方式包括 RS485 串口方式、SDI-12 总线通信,相应的软件协议为 MODBUS 通信协议、单总线通信协议及 SID-12 通信协议,RS485 通信流程如图 7 所示。

(4) 环境参数及叶绿素荧光参数的测量

利用叶绿素荧光传感器对叶片的叶绿素荧光参数测量时,步骤如下:①通过 SDI-12 通信线连接传感器和单片机。②通过叶夹固定叶片,光纤传输荧光。③发送 0M3! 指令,测量 F_m 的预估值。④发送 0M2! 指令,进行零点校准。⑤发送 0M! 指令测量数据,并延迟 5 s 左右,发送 0D! 读取数据。

荧光参数 F_m 和 F_0 需要植物在经过暗适应后测量,为了保证测量的准确性,需要通过 aM2! 和 aM3! 指令进行校准,实时荧光 F_t 为间隔 20 ms 测

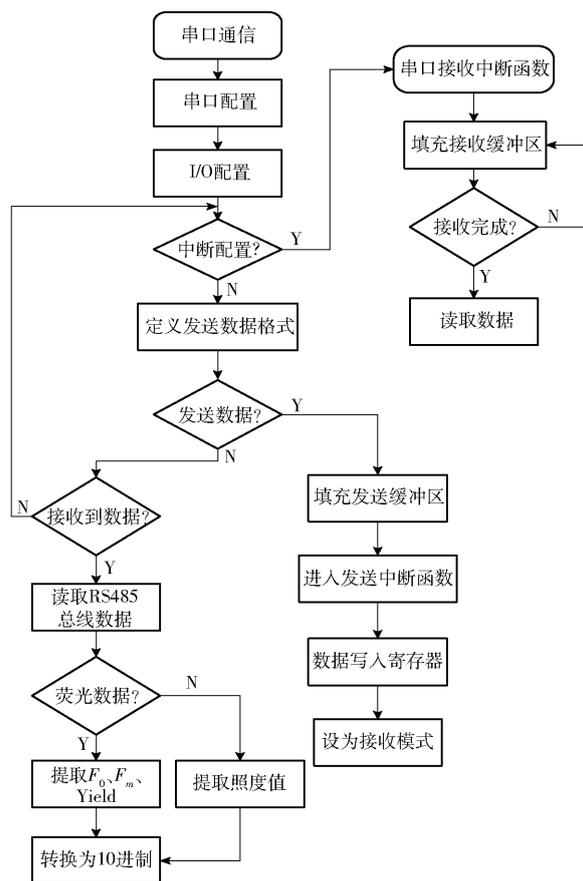


图 7 通信协议流程

Fig. 7 Flow chart of communication protocol

量 1 000 次的平均值,而 F_m 为测量 50 次,取其最大值。

(5) 基于 PWM 的 LED 调光控制

此功能决定调光量,检测模块的温度、光照、荧光参数等信息发送给控制任务,调用控制算法对这些信息进行处理,计算出最优控制值后,通知输出任务进行调控。测量不同 PWM 占空比下光量子计和照度传感器的数值,根据不同的照度求得 PWM 的占空比。占空比调节流程如图 8 所示。

LED 的调控模式分为自动模式和手动模式,手动模式用以判断植物需光量,设置 PWM 的占空比改变 LED 的亮度;自动模式需要设定植物需要满足的荧光参数条件,由 LED 测控系统判定当前环境参数和叶绿素荧光参数下植物需光量,并根据设定值和当前值的差值进行反馈控制,实现基于生物反馈的 LED 自动调光控制。LED 的调控界面如图 9 所示。

4 系统实施与运行试验

4.1 系统试验方案

开发了基于叶绿素荧光传感器的植物 LED 补光测控系统,其示意图如图 10 所示。选择生菜作为研究对象,在江苏大学现代农业装备技术教育部重点实

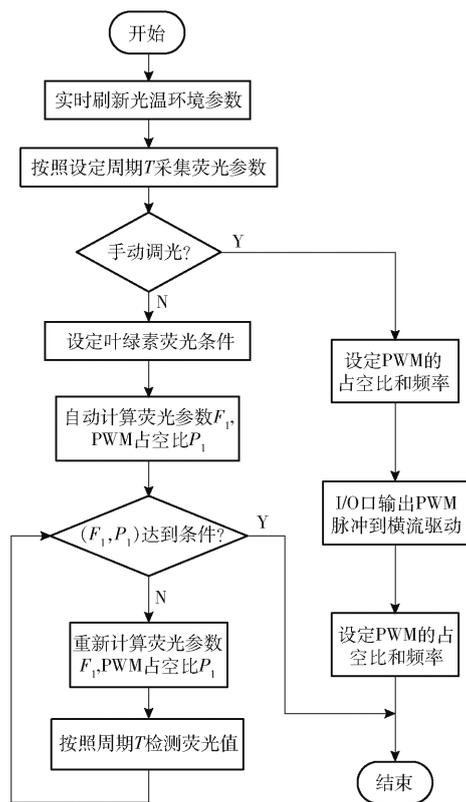


图8 PWM占空比调节流程

Fig. 8 Flow chart of PWM duty cycle control



图9 LED调控界面

Fig. 9 LED control interface

实验室人工气候室进行,设定人工气候室温度 25°C 。进行3组试验,第1组为定值补光(A1),调节LED亮度使光合有效辐射PAR维持在 $370\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;第

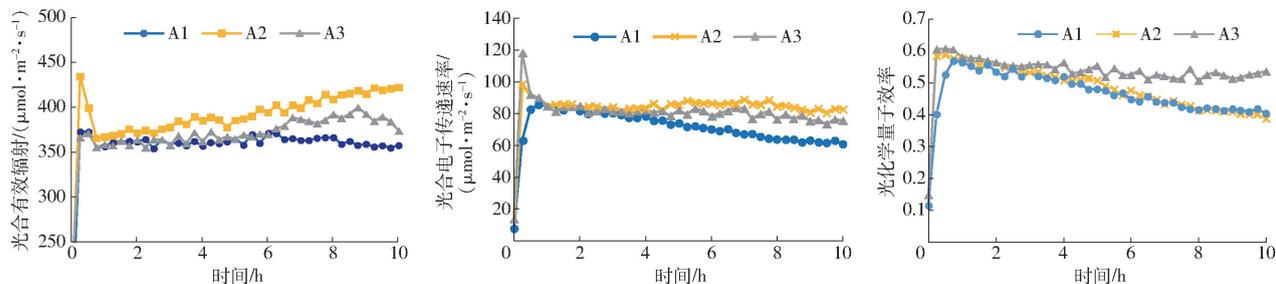


图11 不同调光方式试验结果

Fig. 11 Results of different lighting control modes

2组保持光合电子传递速率ETR恒定(A2),即通过叶绿素荧光传感器测量生菜实时ETR,并通过LED测控系统设定ETR为 $85\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;第3组(A3)结合ETR和光化学量子效率Yield参数来自动调节,设定ETR为 $85\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,Yield为0.51。

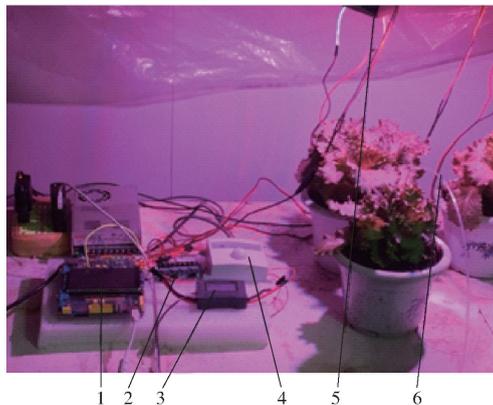


图10 生菜LED补光控制试验系统

Fig. 10 Lighting control experiment system for lettuce

1. MCU 2. 恒流驱动 3. 功率计 4. 照度计 5. LED 6. 叶绿素荧光传感器

4.2 试验结果及分析

不同调光方式的试验结果如图11所示。从图11可以看出,系统可以实现不同调光模式的调控。其中在固定光强调控模式(A1)下,补光灯的光合有效辐射值一直维持在 $370\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,但叶绿素荧光参数ETR和Yield不断降低,表明作物在固定光照情况下并不能维持相应的光合能力,而是随着时间的变化而降低,这与IERSEL等^[20]的结果相一致。在设定固定ETR模式(A2)下,LED补光控制系统可以很好地维持生菜光合电子传递速率为 $(85\pm 3)\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,但随着时间的变化,实际光化学量子效率在不断降低,导致光合有效辐射逐步增加,即在连续补光过程中,光能的利用效率会降低;在综合考虑了光合电子传递速率和光化学量子效率的变化的控制模式(A3)下,通过本LED补光控制系统的调控,使得ETR和光化学量子效率都维持在设定值附近。在A3控制模式下,不仅保证作

物的生长,同时还提高了作物的光能利用率。

5 结论

(1)设计了基于叶绿素荧光传感器的植物LED补光控制系统硬件,利用单片机实现了不同传感器数据采集和基于PWM的LED光强调节以及基于叶绿素荧光传感器的光照反馈控制。

(2)开发了控制系统软件,实现了人机交互、数据采集与管理、实时动态控制等功能。

(3)以生菜为研究对象,进行了光照设定值、光合电子传递速率设定值和结合光合电子传递速率和光化学量子效率参数的光照反馈调节控制,试验结果表明,系统可以实现3种控制模式下的光照调节控制。

参 考 文 献

- [1] IERSEL M W V, GIANINO D. An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses [J]. *Hortscience*, 2017, 52(1):72-77.
- [2] NELSON J A, BUGBEE B. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs high intensity discharge fixtures [J]. *Plos One*, 2014, 9(6):e99010.
- [3] SINGH D, BASU C, MEINHARDT-WOLLWEBER M, et al. LEDs for energy efficient greenhouse lighting [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 49:139-147.
- [4] YEH N, CHUNG J P. High-brightness LEDs—energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8):2175-2180.
- [5] 张海辉, 杨青, 胡瑾, 等. 可控LED亮度的植物自适应精准补光系统[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9):153-158.
ZHANG Haihui, YANG Qing, HU Jin, et al. Self-adaptive and precise supplementary lighting system for plant with controllable LED intensity[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9):153-158. (in Chinese)
- [6] 张海辉, 胡瑾, 杨青, 等. 设施农业可调光质精确补光系统[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3):181-186.
ZHANG Haihui, HU Jin, YANG Qing, et al. Realization of light quality adjustable precise light compensating method in greenhouse agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3):181-186. (in Chinese)
- [7] 刘晓英, 徐志刚, 焦学磊, 等. 可调LED光源系统设计及其对菠菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1):208-212.
LIU Xiaoying, XU Zhigang, JIAO Xuelei, et al. Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1):208-212. (in Chinese)
- [8] 赵启蒙, 周小丽, 周明琦, 等. LED植物补光照明系统对拟南芥萌发的效用探究[J]. *照明工程学报*, 2012, 23(3):64-68.
ZHAO Qimeng, ZHOU Xiaoli, ZHOU Mingqi, et al. Research on the effect of LED lighting system for supplementary lighting on the arabidopsis seed germination [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, 23(3):64-68. (in Chinese)
- [9] 胡瑾, 田威, 赵斌, 等. 基于LED的设施农业智能补光系统[J]. *农机化研究*, 2012, 34(1):56-57.
HU Jin, TIAN Wei, ZHAO Bin, et al. LED based intelligent light supplement system for facility agriculture [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(1):56-57. (in Chinese)
- [10] LI Y, NIU P, SU Z. Design of greenhouse monitoring and control system based on LED lighting [C] // *China International Forum on Solid State Lighting*. IEEE, 2015:123-126.
- [11] GORBE E, CALATAYUD A. Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: a review [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 138:24-35.
- [12] MURCHIE E H, LAWSON T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013:ert208.
- [13] WILLITS D H, PEET M M. Measurement of chlorophyll fluorescence as a heat stress indicator in tomato: laboratory and greenhouse comparisons [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2001, 126(2):188-194.
- [14] MEDINA C L, SOUZA R P, MACHADO E C, et al. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets [J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 96(1-4):115-125.
- [15] SCHONHOF I, KLÄRING H P, KRUMBEIN A, et al. Effect of temperature increase under low radiation conditions on phytochemicals and ascorbic acid in greenhouse grown broccoli [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 119(1):103-111.
- [16] FU W, LI P, WU Y. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 135:45-51.
- [17] JANKA E, KÖRNER O, ROSENQVIST E, et al. High temperature stress monitoring and detection using chlorophyll a fluorescence and infrared thermography in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 67(3):87-94.
- [18] JANKA E, KÖRNER O, ROSENQVIST E, et al. Using the quantum yields of photosystem II and the rate of net photosynthesis to monitor high irradiance and temperature stress in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 90(1):14-22.

- [12] 张磊邦,唐荣斌,蒋建波,等. 基于小波变换的心音特征值提取算法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(6):42-46.
ZHANG Leibang, TANG Rongbin, JIANG Jianbo, et al. Research on characteristic extraction algorithm of heart sound signal using wavelet transformation[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(6):42-46. (in Chinese)
- [13] TIAN X, WANG J, ZHANG X. Discrimination of preserved licorice apricot using electronic tongue[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2013, 58(3-4):737-745.
- [14] WEI Z, WANG J, ZHANG X. Monitoring of quality and storage time of unsealed pasteurized milk by voltammetric electronic tongue[J]. Electrochimica Acta, 2013, 88(2):231-239.
- [15] LIU Miao, WANG Mingjun, WANG Jun, et al. Comparison of random forest, support vector machine and back propagation neural network for electronic tongue data classification; application to the recognition of orange beverage and Chinese vinegar [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 177:970-980.
- [16] 裘姗姗. 基于电子鼻、电子舌及其融合技术对柑橘品质的检测[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
QIU Shanshan. Quality determination of citrus fruit using electronic nose, electronic tongue and fusion system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [17] 马泽亮, 殷廷家, 国婷婷, 等. 采用电子舌法检测橙汁及白酒的品牌及纯度[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8):190-194.
MA Zeliang, YIN Tingjia, GUO Tingting, et al. The brand and purity of orange juice and liquor were tested by electronic tongue method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8):190-194. (in Chinese)
- [18] 史庆瑞, 马泽亮, 周智, 等. 基于电子舌和模式识别的中成药品质辨识方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7):1081-1088.
SHI Qingrui, MA Zeliang, ZHOU Zhi, et al. Research on Chinese patent medicine identification method based on electronic tongue technology and pattern recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7):1081-1088. (in Chinese)
- [19] 何星, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于优选小波包和 ELM 的模拟电路故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11):2614-2619.
HE Xing, WANG Hongli, LU Jinghui, et al. Analog circuit fault diagnosis method based on preferred wavelet packet and ELM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11):2614-2619. (in Chinese)
- [20] 周华平, 袁月. 改进鱼群算法优化的 ELM 在乳腺肿瘤辅助诊断中的应用研究[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(11):2145-2152.
ZHOU Huaping, YUAN Yue. Application of ELM in computer-aided diagnosis of breast tumors based on improved fish swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2017, 39(11):2145-2152. (in Chinese)
- [21] QIU S, WANG J, TANG C, et al. Comparison of ELM, RF, and SVM on E-nose and E-tongue to trace the quality status of mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 166:193-203.
- [22] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11):32-38.
LI Xiaolei, SHAO Zhijiang, QIAN Jixin. An optimizing method based on autonomous animals: fish-swarm algorithm [J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2002, 22(11):32-38. (in Chinese)
- [23] 朱旭辉, 倪志伟, 程美英. 变步长自适应的改进人工鱼群算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(2):210-216.
ZHU Xuhui, NI Zhiwei, CHENG Meiyang. Self-adaptive improved artificial fish swarm algorithm with changing step [J]. Computer Science, 2015, 42(2):210-216. (in Chinese)

(上接第 352 页)

- [19] 纪建伟, 解飞. LED 激发光源叶绿素荧光参数在线监控系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):145-149.
JI Jianwei, XIE Fei. Online monitoring system for chlorophyll fluorescence parameters using LED excitation[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4):145-149. (in Chinese)
- [20] IERSEL M W V, WEAVER G, MARTIN M T, et al. A chlorophyll fluorescence-based biofeedback system to control photosynthetic lighting in controlled environment agriculture [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2016, 141(2):169-176.
- [21] 刘婷. 基于 STM32 的多点加载控制系统的设计 [D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
LIU Ting. Design on the control system of multi-point loading based on the STM32 [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [22] 陈晓丽, 杨其长, 马太光, 等. 不同频率 LED 红蓝光交替照射对生菜生长与品质的影响 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(6):257-262.
CHEN Xiaoli, YANG Qichang, MA Taiguang, et al. Effects of red and blue LED irradiation in different alternating frequencies on growth and quality of lettuce [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):257-262. (in Chinese)