

李晋蒲,曹瑞红,赵建贵,等. 基于 LoRa 的温室智能补光系统研制[J]. 江苏农业科学,2020,48(5):198-204.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.05.042

基于 LoRa 的温室智能补光系统研制

李晋蒲,曹瑞红,赵建贵,高安琪,韦玉翡,李志伟

(山西农业大学工学院,山西晋中 030801)

摘要:由于天气的影响,温室作物面临着光照不足、时间短且不均匀的问题,针对此现象研制了温室智能补光系统。该系统包括环境因子的采集器与控制 LED 亮度的补光器 2 个部分,均采用高速、低功耗的 STM32 核心处理器,利用 LoRa 无线网络实现采集器与补光器之间的数据传输。系统获取光照、温度、CO₂ 环境等数据,并依据基于遗传学算法优化后的温室作物补光数学模型和作物所需最佳红蓝光阈值,对温室内的作物自动补光;补光器采用节能且使用寿命长的红蓝灯相结合的 LED 点阵。试验结果表明,本系统可以实现实时监测环境因子并获取环境数据,实现温室内的自动化补光,具有实用价值。

关键词:温室;LoRa;LED 点阵;智能补光

中图分类号: S625.5⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)05-0198-07

光是绿色植物进行光合作用的基础,是植物生长发育的必要前提^[1]。受冬季天气的影响,温室环境并不能给作物提供充足的光照,致使其长期处于弱光状态,发育与生长速度缓慢甚至停止。因此,设计一套温室补光系统是极有必要的。温室内还存在光照不均匀的现象,为了使温室作物达到最佳的生长环境,需要进行多区域监测;传统有线传输存在布线困难、维护性差的问题,而传统的无线传输距离较短、功耗大。综合以上 2 点,系统采用新型无线 LoRa(long range)网络进行数据传输。LoRa 不仅传输距离远、成本低,而且还极大地改善了接收的灵敏度,大大降低了功耗。发光二极管(LED)相对于传统补光灯来说,具有光谱特性明显、电光转化效率高、易调光、工作电压低、发光均匀稳定和寿命长等优点^[2-4]。以 LED 为主要补光设备为温室内的作物提供充足的光源,不仅可以满足温室作物生长所需的光质,并且功耗低、价格低廉^[5]。现有补光算法大体分为 2 种:一种是基于净光合速率的

补光数学模型,另一种是直接根据作物所需最佳光照进行补光^[6-7]。两者都不能根据实际环境因子给予作物最佳补光数据,针对这种现象,系统以番茄为例,根据实际环境中温度和 CO₂ 浓度,采用了基于遗传学算法的温室作物补光数学模型,可以更加精准地提供补光数据。

系统分为环境因子的采集器与控制 LED 亮度的补光器两大部分。采集器主要是进行多区域监测,采集温室内不同区域的光照、温度和 CO₂ 浓度等信息,并将这些信息传输给补光器;补光器依据基于遗传学算法优化后的温室作物补光数学模型,对采集器传输的数据进行计算,得出该区的最佳光照,并与实际情况对比从而实现对不同区域的精准补光。本系统与传统的补光系统相比,区别在于可以依据温室内不同区域环境的差异和优化后基于遗传学算法的温室作物补光数学模型,分区域进行特定补光,不仅解决了温室内光照不均匀的状况,还能依据温室不同作物的补光阈值,实现多种作物的精准补光,耗能低,实用性更强^[8]。

1 基于遗传学算法的温室作物补光数学模型以及优化

温室内部光照不均匀的问题普遍存在,因此对于温室内不同区域的作物进行同等强度的补光显然是不可取的。本系统采用补光模型,针对温室不同区域的环境因子实现分区补光^[9]。现有遗传学算法寻优目标值模型,根据不同温度以及 CO₂ 浓度

收稿日期:2019-11-25

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0701501);山西省研究生教育创新项目(编号:2019SY201)。

作者简介:李晋蒲(1994—),女,山西晋城人,硕士研究生,研究方向为农业工程、农业电气化及信息化、农业物联网。E-mail:807349720@qq.com。

通信简介:李志伟,博士,教授,博士生导师,主要从事计算机控制技术、智能农业装备和生物环境测控技术研究。E-mail:lizhiweitong@163.com。

来探寻番茄的最优光合速率,基于此获得相应条件下的光子通量密度,也就是相应条件下的光饱和点;然后利用多元回归的方法,通过对不同的温度以及 CO₂ 浓度与相应条件下的光饱和点进行数据拟合,生成了以温度和 CO₂ 浓度为输入,光饱和点为输出的光环境目标值模型^[10]。模型如式(1)所示。

$$I_{LSP} = 32.57 + 75.58T + 0.4617C - 1.202T^2 - 0.004157TC + 0.0000973C^2。$$

(1)

式中: I_{LSP} 表示作物的光饱和点, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; T 表示温室内的温度, $^{\circ}\text{C}$; C 表示温室内 CO₂ 的质量分数, mg/kg 。

系统采用该遗传算法寻优目标值模型作为补光模型。但由于此模型所针对的环境与本系统所针对的环境并不完全一致,在此对其进行了调整。根据本系统所针对的温室环境以及对所测数据的整理和计算,对式(1)优化处理,调整后的模型如式(2)所示。对模型结果进行分析,其确定系数 R^2 为 0.982,表明该模型具有良好的拟合成效;对模型进行验证,得出模型具有良好的测试精度和适用性,光饱和点的实测值与模拟值最大相对误差不超过 5%。

$$I_{LSP} = 33.63 + 74.23T + 0.4519C - 1.113T^2 - 0.003277TC + 0.0001064C^2。$$

(2)

2 系统总体设计

温室智能补光系统包括采集器与补光器两大部分。采集器由若干个采集区实现对温室内各区域光照度、温度以及 CO₂ 浓度等实时数据的采集。由于是分区域进行数据采集,有线传输布线困难,本系统通过 LoRa 无线单元将采集器各区数据信息分别发送至补光器;补光器依据数学补光模型计算出各区该温度与 CO₂ 浓度条件下温室作物所需最佳光强,与该区实时光照数据进行对比,再依据红蓝光配比给定阈值^[11],红蓝光配比如表 1 所示。通过脉冲宽度调制(PWM)控制补光灯的亮暗程度,达到分区智能补光的效果。系统总体结构如图 1 所示。

表 1 几种常见温室作物红蓝光配比

作物	红蓝光配比
番茄	2 : 1
生菜	6 : 1
黄瓜	7 : 1
草莓	4.9 : 1

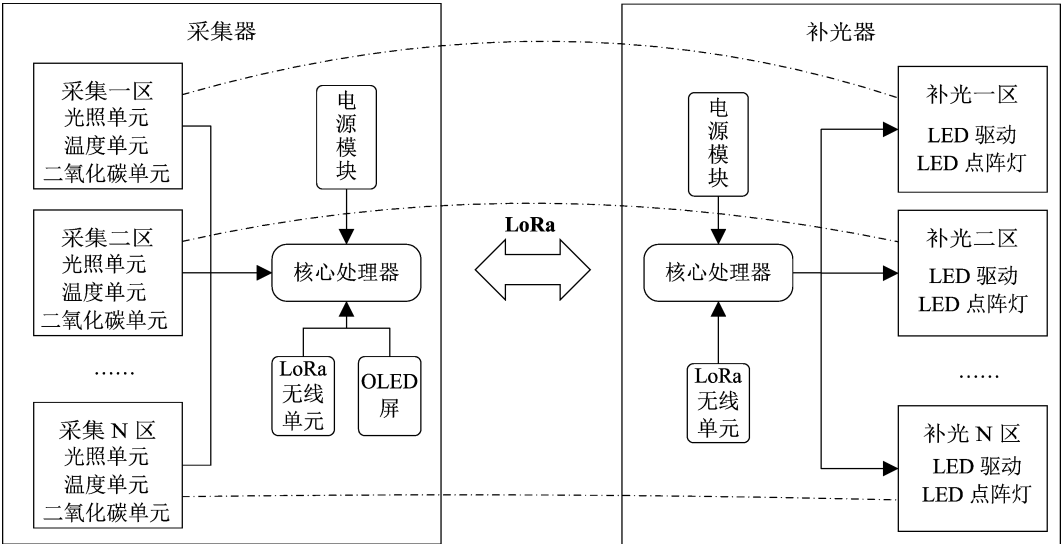


图1 系统总体结构

3 硬件设计

3.1 采集器

采集器由电源模块、核心处理单元、LoRa 无线单元、OLED 屏以及多个采集区组成,每个采集区又

包括光照单元、温度监测单元、CO₂ 浓度监测单元 3 个部分。光照监测单元采用 GY - 30 与 ISL29020 这 2 种传感器结合,主要用于监测温室内的光照度和红蓝光强;温度监测单元采用高精度的 DS18B20,测量范围为 -55 ~ 125 $^{\circ}\text{C}$,精度为 ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ ^[12],实时

监测温室内的温度;CO₂ 浓度监测单元采用 S80053 CO₂,实时监测温室内 CO₂ 浓度的变化,其测量范围为 0 ~ 10 000 mg/kg,测量精度达到 ±40 mg/kg;OLED 屏主要用来显示温室内的环境数据。

3.1.1 电源模块 温室中智能补光系统需要电源模块为其供给能量,因此电源模块是其不可或缺的一部分。本系统有相应的电源接口,可用电源适配器直接为系统供电。由于 STM32F103CBT6 芯片的

额定工作电压为 3.3 V,部分传感器的额定工作电压为 5 V,所以在电源模块中必须进行降压处理。降压处理分为 2 个部分:一是以 12 V 为输入电压,使用 AMS1117-5.0 稳压器先将电压降为 5 V,可以为部分传感器提供电能;二是以 5 V 为输入电压,使用 AMS1117-3.3 稳压器将电压降为 3.3 V,从而为 STM32F103CBT6 芯片提供电源。电源模块的电路原理如图 2 所示。

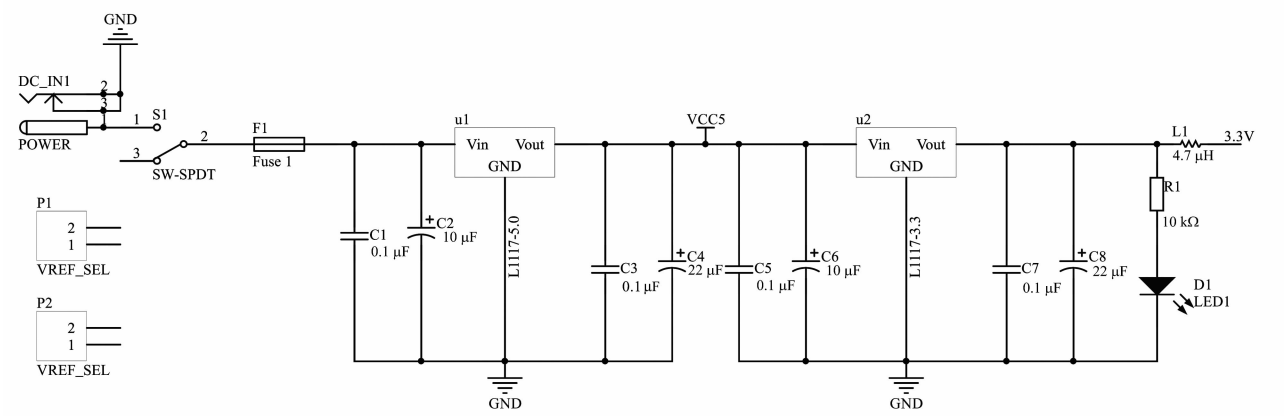


图2 电源模块电路原理

3.1.2 核心处理单元 核心处理单元以 STM32F103CBT6 为核心处理器,处理速度达到 72 MHz,引脚资源 48 个,GPIO 口 37 个,IIC 通信接口 2 个,满足设计需求。STM32F103CBT6 以主流的 Cortex 为内核,性能极高,一流的外设以及低功耗的特性,使其应用起来更加方便。对于本系统来说,STM32F103CBT6 芯片完全满足设计需求。

3.1.3 LoRa 无线单元 无线单元需选用耗能低、

远距离传输、抗干扰能力强的模块,表 2 为几种无线通信的对比。综合分析,该系统采用的无线模块其射频芯片 SX1278 主要采用 LoRa™ 远程调制解调器,以结合高效的循环交错纠错编码算法^[13]。LoRa 工作电流为 12 mA 左右,休眠电流为 200 nA;其传输距离远高于其他无线通讯,普通环境下的传输距离能够达到 3 000 m;抗噪能力强,LoRa 的扩频因子可以达到 6 ~ 12。

表 2 无线通信技术的对比

性能指标	LoRa	ZigBee	BlueTooth	Wi - Fi	GSM、CDMA2000
应用标准	无	802.15.4	802.15.1	802.11b	TIA
通信距离	1 ~ 20 km	10 ~ 2 000 m	10 m	100 m	10 km 以上
通信速率	300 kb/s	250 kb/s	10 kb/s	11 Mb/s	2 Mb/s
低功耗	超低	支持	不支持	不支持	不支持
频段	137 ~ 1 050 MHz	2.4 G/868 M/915 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	800、900、1 800、1 900 MHz

系统采用星型网络结构,采集器和补光器通过主动唤醒进行数据传输,实现系统低功耗策略。采集器通过定时器将 LoRa 唤醒,对补光器下达命令,采集器开始进行数据的采集和传输,完成后进入休眠状态。LoRa 调制解调器使用隐式和显式的数据

包传输格式^[13]。LoRa 数据包格式如表 3 所示。

表 3 LoRa 数据包格式

前导码	报头	CRC	有效负载	负载 CRC
	(显示模式下)			

LoRa 数据包的传输周期涵括了发送前导码周期 T_{preamble} 和报头及有效负载的传输周期 T_{payload} , 前导码传输周期如式(3)所示。

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25) \times T_s \quad (3)$$

式中: n_{preamble} 表示前导码长度, 需在软件设计时设置, T_s 表示 LoRa 符号速率, 根据软件设置的信号扩

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left\{ \text{ceil} \left[\frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right] (CR + 4), 0 \right\} \quad (5)$$

式中: PL 是有效负载字节数; SF 指扩频因子; $IH = 1$ 是禁止报头, $IH = 0$ 是使能报头; $DE = 1$ 是开启低速率优化, $DE = 0$ 是无低速率优化; CR 指编码率, 取值为 1~4。

报头和有效负载传输周期公式为

$$T_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \times T_s \quad (6)$$

数据包传输周期(T_{packet})公式为

$$T_{\text{packet}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}} \quad (7)$$

通过系统将信号扩频因子(SF)设置成 12, 编码率(CR)设置成 1, 带宽(BW)设置成 7, 采用自组网通讯协议提升无线传输速率。

3.1.4 光照监测单元 光照监测单元分为 2 个部分: 一是以 GY-30 为主, 对温室内整体光强进行实时监测; 二是以光强传感器 ISL29020 和红蓝滤光片的组合为主, 实现对室内红光和蓝光光强的监测^[14]。

GY-30 对环境的检测范围大、精度高^[15-16]。利用 GY-30 监测光照度, 与补光模型所计算出的最佳光照度进行对比, 若大于最佳光照度, 则关闭补光灯, 反之, 则进行补光操作。GY-30 数字光照模块与核心处理单元的互联, 并由核心处理单元(采集器)通过 LoRa 无线单元向补光器发送数据。

利用 2 个光强传感器 ISL29020 分别完成对红光和蓝光的监测和分析: 在检测红光时, 使用可使 625~740 nm 范围内红光透过的滤光片加在 ISL29020 上, 使红光照射到 ISL29020, 从而使其检测红光; 在检测蓝光时, 使用可使 400~480 nm 范围内蓝光透过的滤光片加在 ISL29020 上, 使蓝光照射到 ISL29020, 从而使其检测蓝光^[11]。ISL29020 与采集器中的核心处理单元相连, 通过 LoRa 无线单元将获取的光照度传输给补光器。

3.2 补光器

补光器由核心处理单元、电源模块、LoRa 无线单元、LED 点阵灯、LED 驱动单元 5 个部分构成。其中 LED 点阵灯、LED 驱动单元组成了若干个补光区, 与采集区一一对应, 实现分区补光。LED 点阵

灯由红、蓝 2 种灯组成 10×10 的矩形阵^[17], 根据 LED 驱动单元的调节, 实现对温室内作物进行补光的变换; LED 驱动单元主要对光环境进行调控, 即改变 LED 点阵灯的亮度, 将补光器中核心处理单元发出的微弱信号转变为大电流, 由此完成光强信息动态调控的过程, 可以根据温室作物所需最佳光照量, 周期性地调节温室内的光强。

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (4)$$

对于数据包报头和有效负载周期的计算, 首先确定符号 n_{payload} 的数目, 计算公式为

灯由红、蓝 2 种灯组成 10×10 的矩形阵^[17], 根据 LED 驱动单元的调节, 实现对温室内作物进行补光的变换; LED 驱动单元主要对光环境进行调控, 即改变 LED 点阵灯的亮度, 将补光器中核心处理单元发出的微弱信号转变为大电流, 由此完成光强信息动态调控的过程, 可以根据温室作物所需最佳光照量, 周期性地调节温室内的光强。

3.2.1 LED 点阵灯 温室内植物的光合作用以及生长发育所需的主要光质是蓝光和红光^[18], 有研究表明, 红光和蓝光组合可以明显提高番茄的光合速率, 使其加速生长并改善其品质^[11]。因此, 选用红、蓝 2 种光源组合作为补光光源是比较理想的。基于上述原因, 系统使用红、蓝 2 种 LED 灯源来为温室中的农作物进行补光。本系统选用的是超高亮度 LED 圆形灯^[11], 具体参数如表 4 所示。

表 4 红、蓝 LED 灯的参数

LED 灯	波长 (nm)	额定电流 (mA)	带宽 (nm)	直径 (mm)	发光强度 (cd)
红光 LED	639	10	30	5	22~25
蓝光 LED	462	20	30	5	5~7

由于单颗 LED 灯光照度有限, 不足以补充足够的光照, 在此将多颗 LED 灯进行了组合排列。除此之外, 为了使各个植株可以同时吸收红光和蓝光, 且使光源均匀, 系统采用互相交叉的方式安装补光灯, 红灯和蓝灯相互交错。综合上述 2 点, 本系统采用了 10×10 的矩阵模型, 每个灯四周排布了与其不一样的灯。其中, 水平与竖直方向上每相邻两灯之间的距离经测验以 2.2 cm 最优。具体如图 3 所示。

3.2.2 LED 驱动单元 相对于其他调光方式, PWM 调光拥有绝对优势: (1) 高精度, 可以实现精准调光, 从而使补光效果更佳; (2) 可使 LED 灯保持在恒流条件下工作, 大大减少了 LED 灯的损坏, 提高其使用寿命; (3) 颜色一致性好, 可以极好地避免 LED 出现色偏^[17]。基于上述几点, 以及为了能够有效地控制红蓝补光灯的亮度, 系统采用了 PWM 调光方式。

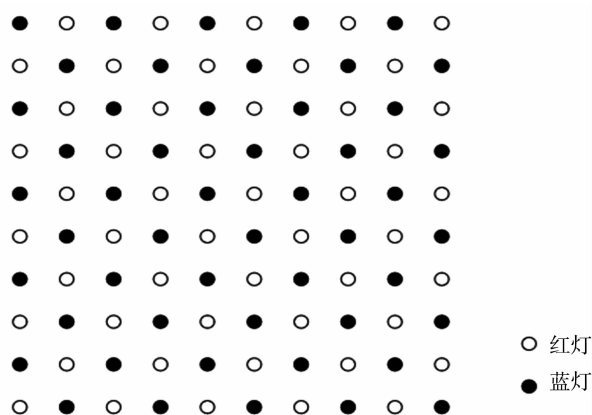


图3 LED 点阵

LED 驱动单元以 PT4115 恒流驱动为核心,搭配电阻、电容、电感等元器件,构成驱动电路,具体如图 4 所示。PT4115 恒流驱动通过 DIM 引进并直接接受 PWM,支持 PWM 调光。此外,可以通过采样电阻 R_s 设定输出控制 LED 的最大平均电流^[11],电流计算如式(8)所示。

$$I_{out} = 0.1 \times D / R_s \quad (8)$$

式中: I_{out} 是控制 LED 的最大平均电流; D 是 PWM 的占空比; R_s 为采样电阻。

驱动电路以及补光灯阵如图 4 所示。

4 软件设计

本系统的采集器和补光器均以 STM32F103CBT6 单片机为核心:采集器利用 GY-30、ISL29020、DS18B20、S8 0053CO2 这 4 种传感器实现对温室内环境因子的采集,通过 LoRa 无线单元再将数据传递给补光器,通过补光器对数据进行处理并实现自适应功能。该系统的程序流程图如图 5 所示。

首先对整个系统进行初始化,初始化成功后,采集器和补光器均做好准备。以采集一区为例:采集一区采集当前温室内一区的光照、 CO_2 浓度、温度、红蓝光强等信息,并将这些信息通过 LoRa 无线单元传送给补光器^[18]。补光器的核心处理器接收到数据后,通过补光模型计算出一区作物的最佳光照度,并与一区的实时光照进行对比:若实时光照度大于或等于最佳光照度,则使补光一区的灯为灭;若实时光照度小于最佳光照度,则对比红蓝光强是否小于预先设定的阈值,根据阈值与一区实际红蓝光强的差值,通过 PWM 改变补光一区 LED 点阵灯亮度,对温室内光照度进行调整。5 min 后,采集一区重新采集数据,以此循环。其他采集区也依

照采集一区的方法进行实时补光。

5 结论

根据温室作物在不同温度、 CO_2 浓度的条件下所需的光饱和度和红蓝光阈值,本研究设计了一种基于 LoRa 温室智能补光系统,利用 GY-30 实时监测温室的整体光照情况,根据补光模型得到实际光照度与作物所需最佳光照的差值,核心处理单元通过改变 PWM 信号改变 LED 补光灯的亮度,来实现温室内的精准补光^[19]。将该系统置于温室进行运行测试,结果表明,LoRa 无线单元在数据发送与接收中传输良好,基本无误与延迟;采集器采集的数据精度比较准确,基本上完成了对温室内部环境的多区域监测;补光器能够根据数据信息发出 PWM 信号,准确调整 LED 点阵灯的亮度,实现对温室作物的精准补光^[20]。本设计实现了对温室作物的自动化补光,并具有良好的稳定性,节约了人力,实现了温室作物高效定量的调控目的;其功能强、操作性好,具有成本低、可自动补光的优点,因此具有一定的社会价值和应用价值。

参考文献:

- [1] 朱 舟,童向亚,郑书河. 基于作物光照需求的温室光调控系统[J]. 农机化研究,2016,38(2):192-196.
- [2] 程望斌,刘金刚,刘碧篮,等. 自适应 LED 补光照明系统的设计与研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2018,31(4):23-26.
- [3] 徐一清. LED 组合光源的优化设计及其在温室植物生产中的应用[D]. 杭州:浙江农林大学,2017.
- [4] 付 明. LED 植物生长补光灯在辽宁省茄果类蔬菜生产上的应用[J]. 蔬菜,2018(8):47-49.
- [5] 都金龙. 植物补光系统在温室中的应用[N]. 中国花卉报,2011-12-17(3).
- [6] 闫文凯,张雅婷,张玉琪,等. LED 株间补光对日光温室番茄产量及光合作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(7):132-138,146.
- [7] 赵秀元. 北方地区温室番茄栽培技术[J]. 山西农业科学,2009,37(7):87-88.
- [8] 王 静,崔庆法,林茂兹. 不同结构日光温室光环境及补光研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):86-89.
- [9] 徐 永. 温室补光及其发展趋势[J]. 农业工程技术,2015(28):29-32.
- [10] 胡 瑾. 基于作物光合需求的设施光环境调控方法与技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [11] 李 明,刘 娟,凌广明. 温室大棚 LED 智能补光自适应控制系统[J]. 江苏农业科学,2018,46(11):193-196.
- [12] 周克辉. 基于单片机控制的 DS18B20 数字温度计设计[J]. 湖

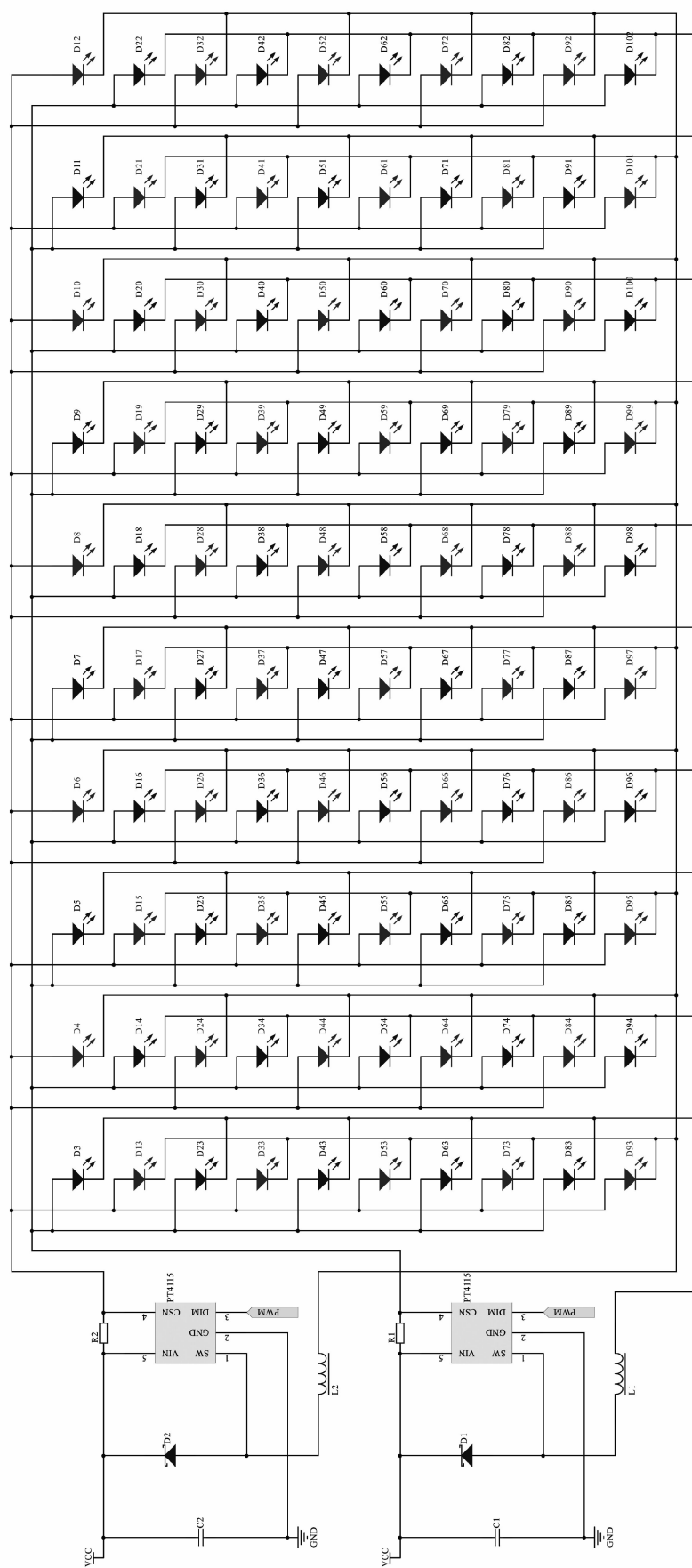


图4 驱动电路以及补光灯阵电路

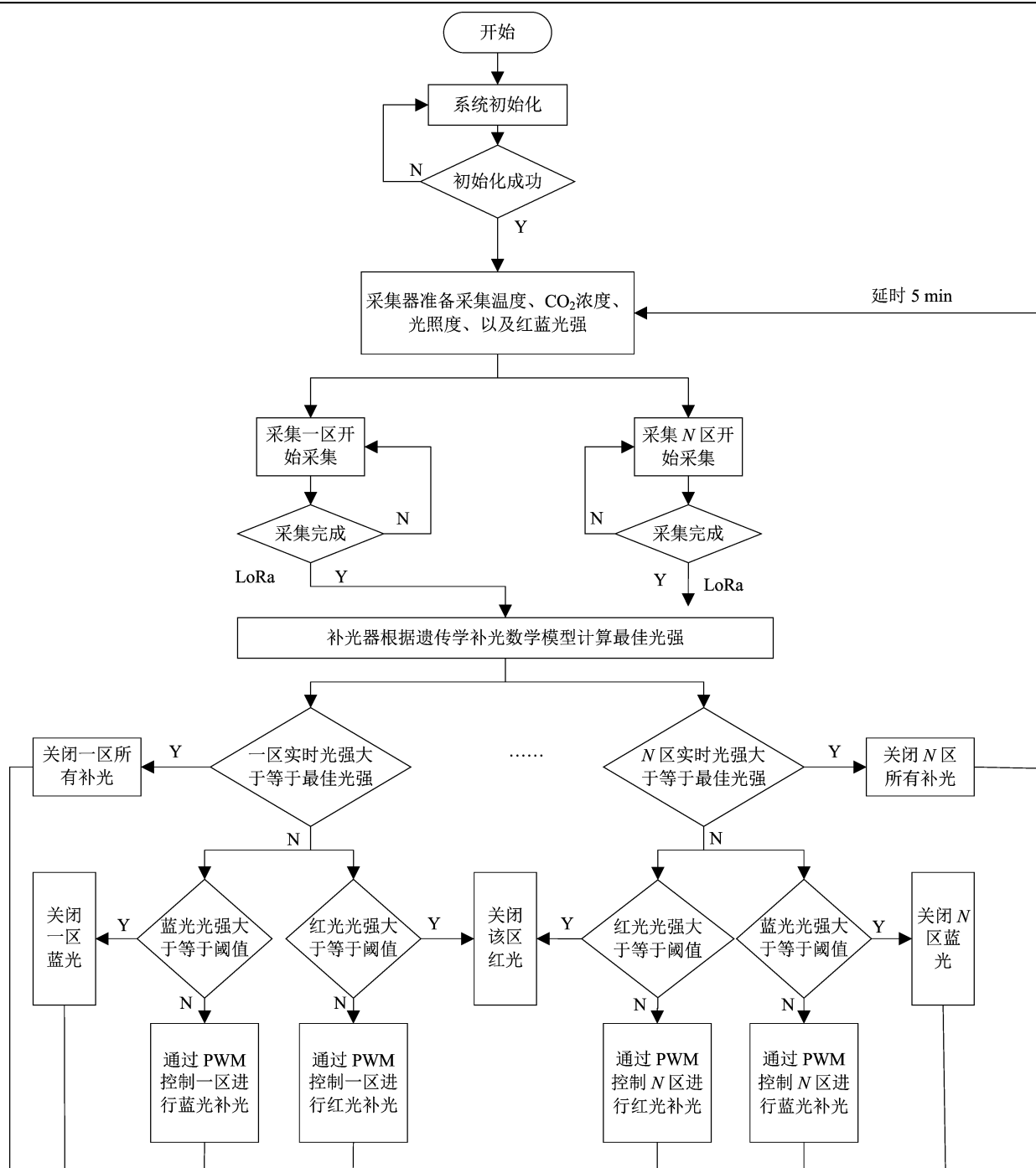


图5 系统程序流程

南农机,2010,37(11):61-62.

[13]柳永波. 基于 LoRa 的无线自组网 MAC 协议研究[D]. 陕西西安:西安电子科技大学,2017.

[14]张辉,卜雯意,施豪. 日光式室内植物生长 LED 灯模型的建立与实现[J]. 黄山学院学报,2018,20(5):36-40.

[15]韩文. LED 补光对番茄幼苗生长调控的研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.

[16]邓一凡. LED 植物补光系统优化设计与控制[D]. 天津:河北工业大学,2017.

[17]张现征,王丹,董飞,等. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):136-138.

[18]代家为. 温室大棚中智能补光控制系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2017.

[19]王琦,梁铎耀,孙竹梅,等. 光热感应温室自动控制系统设计[J]. 自动化仪表,2018,39(9):59-62.

[20]马志远. 晋中市平川番茄周年生产技术[J]. 山西农业科学,2011,39(7):676-678,692.