Design of a Control System for Specialized Plant Cultivation

Kunhao Hu Xiao Xiao Bo Zhou Shenghan Zheng

School of International Studies, Hunan University of Arts and Science, Changde, Hunan, 415000, China

Abstract

Addressing the application scenarios of specialized plant cultivation, this study develops an environmental collaborative regulation device powered by an STC89C52RC microcontroller as its computational core. This device integrates LED light source modulation technology, a closed-loop temperature and humidity feedback control strategy, and a nutrient solution circulation pathway, aiming to achieve comprehensive management and control of the micro-ecological environment for plant cultivation. The system utilizes an AM2301 digital sensor to collect environmental parameters in real time, employs a PID algorithm to dynamically correct deviations in temperature and humidity, and employs PWM dimming technology to precisely regulate the photosynthetic photon flux density. Additionally, an embedded time-series management module simulates natural circadian rhythms, enabling automated intervention throughout the entire plant growth cycle. Validation experiments demonstrate that this control system exhibits excellent control accuracy across various environmental parameters and is capable of meeting the fundamental engineering requirements for specialized plant cultivation.

Keywords

spatial planting; microprocessor; PID algorithm; environmental control

面向特种种植的控制系统设计

胡琨昊 肖潇 周博 郑胜寒

湖南文理学院国际学院，中国·湖南 常德 415000

摘要

针对特种植物栽培的应用场景，本研究研发了一款以STC89C52RC微控制器为运算核心的环境协同调控装置。该装置整合了LED光源调制技术、温湿度闭环反馈策略及营养液循环通路，旨在实现对培育微生态环境的综合管控。系统借助AM2301数字传感器实时采集环境参量，采用PID算法动态修正温湿度偏差，并通过PWM调光技术精确调节光合光子通量密度。同时，内嵌的时序管理模块可模拟自然昼夜节律，进而完成对植物生长全流程的自动化干预。验证实验表明，该调控系统对各环境因子的控制精度良好，能够契合特种植物栽培的基本工程指标。

关键词

空间种植；微处理器；PID算法；环境控制

1 引言

当前，深空探测中物资自给尤其是食品供应已成核心难题[1]。封闭栽培特种植物可降低补给依赖、节约成本，并提供新鲜食材与心理支持。光照调控至关重要，460 nm蓝光与660 nm红光对植物代谢与形态建成效果最佳[2-3]。但微重力引发植物生长异常，地面经验难以适用，需发展专属策略。本文基于现有技术，结合空间站约束，设计特种种植专用控制系统，集成LED调光、无土供液与智能自控模块，为未来任务提供技术支撑[4-5]。

【基金项目】国家级大学生创新训练计划项目（S202410549015）。

【作者简介】胡琨昊（2003-），男，中国湖南永州人，本科，从事机电一体化，特种种植创新创业的研究。

2 总体设计

2.1 结构组成

特种植物生长环境控制系统由环境感知单元（AM2301传感器）、核心处理单元（单片机系统）、执行驱动单元（温湿度控制回路、LED调光回路、营养液循环回路）及辅助管理单元（人机交互与定时模块）共同构成[6-7]。单片机系统作为主控枢纽，在完成多源传感数据融合后，经PID算法解算生成控制量，驱动各执行器协同动作；用户则可通过交互终端查看和设置参数。

系统硬件框图如图1所示。

2.2 工作过程

依据用户所选的植物种类，自动匹配数据库中的

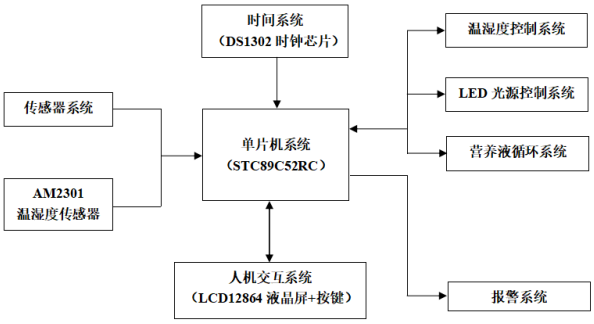


图1 系统硬件框图

最优生长曲线，联动温湿度、光照度与液体流动三路执行机构。温湿度控制基于AM2301传感反馈与PID算法实现动态跟踪；光照度选用460 nm/660 nm双色LED，由PWM调光并配合时钟模块再现昼夜节律；营养液则按30分钟间隔、每次2分钟的时序完成循环过滤。

3 系统硬件设计

3.1 单片机最小系统

核心处理器选用STC89C52RC单片机，其内置看门狗电路，通过继电器控制各个子系统工作。外围驱动方面，单片机I/O经光耦EL817隔离后驱动继电器，以控制DD311芯片的供电通断；另由PWM端口输出调光信号至DD311使能端，从而实现对LED照度的独立调节。

3.2 温湿度系统

温湿度调控单元以AM2301数字式温湿度传感器为感知前端，以半导体温差片制冷组与制热组为双向执行机构。AM2301集成校准数字信号输出接口，具备响应快速、抗干扰性强及成本适中的综合优势。在工作机制上，单片机经由继电器实现对制冷/制热模组的独立通断切换；传感器实时采集环境温湿度并回传至单片机，后者基于增量式PID算法解算控制量，决策制冷或制热动作的启停与持续时间长短。

3.3 LED光源系统

光照子系统选用高亮度单色LED灯珠作为发光元件，主波长为460 nm（蓝光）与660 nm（红光）。驱动方案采用DD311恒流驱动芯片，其输出电流由PWM信号进行线性调节，系统以5 V开关电源作为统一供电来源。在灯珠排布上，系统共配置3条LED灯具，每条灯具包含2路460 nm及2路660 nm通道，每路由6颗灯珠串联构成，总计12路并联通道。在功能层面，系统内置光照时序管理模块，可模拟日出日落的光照渐变过程，通过编程设定光周期参数，实现对植物光周期反应的人为干预，进而调控其生长规律。

3.4 营养液循环系统

营养液循环子系统由循环管路、净化装置与驱动水泵三部分构成。其工作流程为：营养液自管路输入端流入，经净化装置滤除浮游生物、藻类等影响植物健康生长的悬浮杂质后，由循环水泵输出洁净液流。控制层面，单片机通过继电器实现对系统电源的通断管理，同时利用PWM信号调节水泵电机转速，进而改变循环流速。针对空间微重力环境下的特殊流体行为，系统借鉴了国际空间站Veggie装置的成熟水培方案，采用毛细作用驱动方式，将营养液输送至含有基质、养分及种子的根枕区域，以保障种子萌发阶段的液供给，并在全生长期内维持持续的水分供应[1]。

3.5 人机接口

人机交互界面采用独立式键盘与LCD12864点阵液晶屏协同构建。键盘通过优先编码器连接至单片机I/O端口，固化了菜单切换、数值增减（上翻/下翻）、确认执行等按键功能映射，满足参数浏览与设定操作需求。液晶显示模块则实时呈现播种时间、生长周期天数、当前温度及相对湿度等关键指标，为用户提供直观的运行状态监测界面，便于快捷评估培育环境的适宜性。

4 软件系统设计

4.1 软件控制流程

系统运行时，AM2301传感器实时采集环境温湿度参量并上传至单片机。单片机一方面将接收数据与数据库中的品种适宜参数进行比对判读，同步驱动液晶屏刷新显示当前温湿度数值；另一方面依据DS1302时钟芯片提供的实时时间，与数据库设定的光照周期进行匹配，决策LED光源系统的启闭时机，并自动为所选植物品种匹配相应的光环境方案。此外，单片机按预设时序定期激活营养液循环系统，执行水槽清洁维护。

在软件架构层面，主程序循环承担系统初始化、键盘扫描、温度采样与数字滤波、显示刷新及控制输出等周期性任务；其中，定时器T0负责采样节拍管

理，系统设定采样周期为3秒，控制周期为1秒。

4.2 PID控制算法

针对植物生长环境这一典型的一阶纯滞后系统，常规PID控制策略在阶跃响应过程中易产生显著超调，难以兼顾快速性与稳定性。为此，本系统采用积分分离的改进型数字PID算法：当被控变量与目标设定值之间的偏差超出预设阈值时，暂时屏蔽积分环节以避免积分累积引发的控制量饱和；当偏差回落至阈值以内时，重新引入积分作用以消除稳态余差。该策略通过积分环节的有条件变换，在改善系统动态品质的同时保证了稳态精度。

数字PID算法的增量式表示为：

$$\Delta u(k) = Kp \cdot [e(k)-e(k-1)] + Ki \cdot e(k) + Kd \cdot [e(k)-2e(k-1)+e(k-2)] \quad （式1）$$

其中，Δu(k)为第 k次采样的控制量增量；e(k), e(k-1), e(k-2)为当前及前两次采样误差；Kp为比例系数, Ki为积分系数, Kd为微分系数。

4.3 PID参数整定

Kp：比例系数影响系统的响应速度。在增量式中，它作用于误差的变化率，过大会导致系统震荡，过小则迟钝。

Ki：积分系数影响系统的稳态精度。它作用于当前的绝对误差。在增量式中，积分项是消除误差的主力。

K d：微分系数影响系统的抗扰动能力。它作用于误差的二次差分（变化率的斜率）。主要用来抑制超调和克服大惯性滞后。

采用扩充临界比例度法整定PID参数。

前提假设：PID控制系统是负反馈，且采样周期T已确定（采样周期一般为系统纯滞后时间的 1/10 ~ 1/5）。

第一步：纯比例（Ki=0,Kd=0）——求临界值

（1）将Ki和Kd设置为0。

（2）从很小的Kp（例如 0.5）开始逐渐增大。

（3）给系统一个阶跃给定（如目标值从 0 变到 100）。

（4）观察响应曲线，直到输出波形出现等幅震荡（不衰减也不发散）。

（5）记录此时的临界增益Ku和临界震荡周期Tu。

第二步：针对增量式PID根据经验公式套用初始值

（1）Kp一般取0.6倍Ku，积分时间Ti一般取0.5倍Tu，微分时间Td一般取0.125倍Tu。

（2）结合采样周期□将时间常数换算成公式系数：

$$Ki=Kp\times T/Ti \quad （式2）$$

$$Kd=Kp\times Td/T \quad （式3）$$

第三步：按优先级现场微调

套用上述计算值后，给系统加扰动，按以下顺序微调：

（1）先调Kp：若响应太慢，增大Kp（每次增加10%~20%）；若超调过大或震荡，减小Kp。

（2）再调Ki：若稳态时存在残差（回不到设定值），增大Ki；若出现“腰振”（低频缓慢摆动），则减小Ki。

（3）最后调Kd：若启动瞬间冲过头（超调），增大Kd来刹车；若系统对噪声敏感（输出毛刺多），减小Kd或直接设为0。

注意事项：

一是Ki不是越大越好。公式里Ki乘以的是当前误差e(k)，如果负载突变且误差较大，Ki太大会导致Δu(k)剧烈跳跃。

二是Kd容易放大噪声。公式里Kd项相当于对误差做了二阶差分。如果反馈信号有轻微波动，这项会剧烈抖动。实际系统是温度、液位等大惯性系统，一般将Kd设为 0，只用PI控制。

三是积分分离。当|e(k)|>允许范围时，强制令Ki=0，只让PD起作用，防止积分累计导致超调过大。

例如：基于温控对象阶跃响应特性，取控制度1.2，采样周期T=3s，通过临界比例度法测得Ku=5.2，Tu=30 s，经整定规则计算得PI初值Kp=3.12，Ti=15 s，Td=3.75 s。为进一步优化控制品质，在此初值基础上开展参数扫描微调，综合考虑超调量、调节时间与稳态误差三项指标后，确定最优参数为Kp=0.63，Ki=1.25。

5 功能性检验

5.1 系统光通量控制结果

LED光源系统的红蓝光量子通量密度通过PWM占空比进行调节。为建立PWM占空比与光量子通量密度之间的映射关系，采用远方SPIC-200光谱仪对不同PWM值下两种波长LED的输出光量子通量密度进行逐点测量。基于实验数据，对测量结果进行函数拟合，获得光量子通量密度随PWM占空比变化的拟合曲线及其对应的数学模型。拟合结果表明，PWM占空比与LED光量子通量密度呈良好的线性关系，决定系数（R^2）值达到0.99以上，说明系统能够精确控制LED输出光通量。

5.2 温度控制测试结果

温度闭环控制采用增量式PID算法，以AM2301实时采集的温度值作为反馈量，以DS1302提供的时序节拍作为采样基准，将被控变量与数据库设定值之间的偏差作为控制依据，由单片机判决策略并驱动制冷或制热执行机构动作。

实验在常温实验室条件下开展，设定目标温度为25 ℃，初始环境温度为22.5 ℃。实验数据表明：系统上升时间约为180 s，调节时间约为300 s，稳态温度与设定值之间的偏差为±0.3 ℃。结果表明，本系统具备良好的温度跟踪与稳态保持能力，控温精度满足植物正常生长发育的环境需求。

5.3 湿度控制测试结果

湿度调控采用增量式PID算法，以温湿度传感器实时反馈的设备内部湿度值作为被控变量，由单片机根据实测值与设定值的偏差决策加湿执行机构的通断操作。为验证湿度控制性能，在目标湿度条件下开展阶跃响应实验。由实验数据可知，当湿度设定值增加30%RH时，系统完成该阶跃过渡过程耗时440 s。测试结果表明，本系统具备良好的湿度跟踪与稳态维持能力，控制品质满足植物生长发育对空气湿度的区间要求。

6 结语

本文研发了一款面向特种植物栽培应用的环境智能控制系统。该系统以STC89C52RC单片机为控制核心，集成LED光环境调控、温湿度闭环管理及营养液循环供给三大功能模块。在光照控制方面，通过标定PWM占空比与光合光子通量密度的映射关系，实现了输出光强的精确调节，并结合实时时钟模块模拟昼夜交替节律，以驱动植物光周期响应。在温湿度管理方面，系统以传感器实时反馈为输入，经由PID控制算法动态补偿环境偏差，确保栽培腔体持续维持在目标生长区间。

试验结果表明，该系统能够有效控制植物生长环境参数，温度稳态精度达±0.5 ℃，湿度阶跃响应速率满足植物生理需求，光照输出具有良好的线性调控特性。该系统可进一步应用于空间站植物种植实验，为深空探测中的生命保障系统提供技术支撑。

参考文献

[1] 迟惑.国际空间站上的种植实验[J].太空探索,2022,(11):36-41.

[2] 麦强.基于LED红蓝组合光源的蔬菜贮藏保鲜系统[J].食品工业,2020,41(11):241-244.

[3] 麦强,陈思波,黄金祥,等.植物生长环境控制系统设计与试验[J].农业工程,2018,8(5):45-46.

[4] 王嘉,强凯,马全会,等.不同浓度氨基酸营养液对无土栽培番茄生长、产量及果实品质的影响[J].新疆农垦科技,2026,49(2):59-62.

[5] 张婷,刘学刚,蔡永权,等.不同除湿技术对北疆温室冬季温湿度的影响[J].新疆农垦科技,2026,49(3):56-59.

[6] 姜新宇,唐娟.温室大棚智能遮光系统设计[J].农技服务,2017,34(6):152-153.

[7] 薛莹.草莓西红柿种植管理技术[J].特种经济动植物,2025,28(3):110-112.