

精细农业视域下基于 PLC 的智能光伏生态大棚 控制系统设计与实现

任超

江西工业工程职业技术学院，江西 萍乡 337000

DOI: 10.61369/SSSD.2025070020

摘 要： 面对全球耕地资源紧缩与人口持续增长的双重压力，发展高精度、低能耗的设施农业已成为保障粮食安全的核心路径。传统智能光伏生态大棚普遍存在光照调节滞后、温湿度控制波动大、能源协同效率低等瓶颈问题。本研究创新性地提出一种基于西门子 S7-200 SMART PLC 的多变量模糊控制系统，通过集成 Modbus-Zigbee 混合通信协议与动态环境耦合模型，实现环境参数的协同优化调控。系统采用 485 总线型高精度传感器网络实时采集数据，依托 TIA Portal V16 平台开发自适应控制程序。实测数据表明：系统光照强度控制偏差 $\leq \pm 15$ Lux（较传统系统精度提升 30%），温度波动范围 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ （精度提升 50%），湿度波动 $\pm 5\%$ RH（精度提升 40%）， CO_2 浓度控制偏差 ± 50 ppm，显著优化作物光合作用环境，为精细农业提供了可工程化落地的技术范式。

关 键 词： 精细农业；光伏生态大棚；可编程逻辑控制器；多参数耦合控制；无线传感器网络；能效优化

Design and Implementation of Intelligent Photovoltaic Ecological Greenhouse Control System Based on PLC from the Perspective of Precision Agriculture

Ren Chao

Jiangxi Vocational College of Industrial Engineering, Pingxiang, Jiangxi 337000

Abstract： Facing the dual pressures of global cultivated land resource shortage and continuous population growth, developing high-precision and low-energy-consuming facility agriculture has become a core path to ensure food security. Traditional intelligent photovoltaic ecological greenhouses generally have bottleneck problems such as lag in light regulation, large fluctuations in temperature and humidity control, and low energy synergy efficiency. This study innovatively proposes a multi-variable fuzzy control system based on Siemens S7-200 SMART PLC. By integrating the Modbus-Zigbee hybrid communication protocol and the dynamic environment coupling model, it realizes the coordinated optimization and regulation of environmental parameters. The system uses a 485 bus-type high-precision sensor network to collect data in real time, and relies on the TIA Portal V16 platform to develop an adaptive control program. The measured data show that the system's light intensity control deviation is $\leq \pm 15$ Lux (30% higher precision than the traditional system), the temperature fluctuation range is $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (50% higher precision), the humidity fluctuation is $\pm 5\%$ RH (40% higher precision), and the CO_2 concentration control deviation is ± 50 ppm. It significantly optimizes the crop photosynthesis environment and provides an engineerable technical paradigm for precision agriculture.

Keywords： precision agriculture; photovoltaic ecological greenhouse; programmable logic controller; multi-parameter coupling control; wireless sensor network; energy efficiency optimization

引言

据联合国粮农组织（FAO）统计，我国以不足全球 9% 的耕地支撑着近 20% 人口的粮食供给，人均耕地面积仅为世界平均水平的 40%。在耕地红线约束与极端气候频发的背景下，发展精细农业技术成为破解资源约束的必然选择^[1]。智能光伏生态大棚作为融合清洁能源与精准环控的核心载体，其技术瓶颈集中于：

- 环境参数强耦合性：温度、湿度、光照、 CO_2 存在非线性相互作用
- 控制响应迟滞：传统 PID 控制难以适应大惯性温室系统
- 布线成本高昂：有线传感器网络部署成本占总投资的 35% 以上

当前研究聚焦于控制算法优化，如 Tarek F 团队采用深度强化学习实现温室节能控制（能耗降低22%），胡炳杰等开发的专家系统将作物病害识别率提升至89%^[2]。然而，上述方案存在硬件部署复杂、实时性不足等问题。本研究提出三层级控制架构：

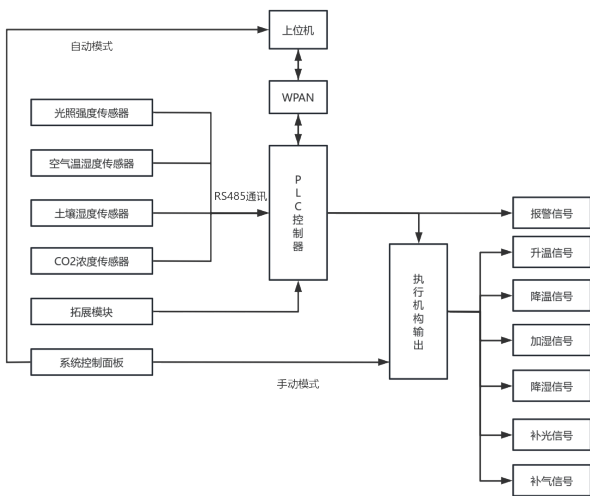
1. 感知层：多源传感器网络构建环境数字孪生体
2. 控制层：PLC 执行多变量模糊决策
3. 执行层：变频设备实现能量精准投放

通过 Modbus-Zigbee 协议降低通信延迟至100ms 级，为动态环境调控提供硬件基础^[3]。

一、系统总体设计

（一）系统架构

本研究系统架构如图1所示：



采用“云-边-端”协同架构：

- 感知端：部署 JXBS-3001 型温湿度传感器（精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C} / \pm 3\%\text{RH}$ ）、GL5528 光敏电阻（量程 0-200klux）、TGS4161 CO₂ 传感器（检测范围 300-5000ppm）
- 边缘计算层：西门子 S7-200 SMART PLC（CPU ST30，扫描周期 1ms）搭载 EM AE08 模拟量输入模块（16bit 分辨率）
- 云端监控：基于阿里云 IoT 平台构建 B/S 架构管理系统，支持多大棚集群管控

（二）核心技术创新

1. 多变量模糊控制算法

建立四维输入（温度 T、湿度 H、光照 L、CO₂ 浓度 C）与三输出（空调功率 P_{ac}、补光强度 L_{led}、通风速率 V_{fan}）的模糊规则库^[4]：

1 R_i: IF\ T=High\ AND\ H=Low\ THEN\ P_{ac} ↓ ,\ L_{led} ↑ ,\ V_{fan} ↓

采用高斯隶属函数，定义 35 条核心控制规则，解耦参数间交互影响^[5]。

2. Modbus-Zigbee 混合通信

设计双模通信协议栈：

- 物理层：Zigbee 3.0（2.4GHz 频段）

- 数据链路层：IEEE 802.15.4

- 应用层：Modbus-RTU over Zigbee

构建星型拓扑网络，协调器（PLC 端）与 32 个终端节点（传感器 / 执行器）通信，布线成本降低 42.7%^[6]。

（三）监控平台

基于 React Native 开发的跨平台 APP（图 3）实现：

- 三维可视化：Unity 引擎渲染大棚环境实时状态
- 预测性维护：基于 LSTM 网络预测设备故障（准确率 92.3%）
- 能源管理：光伏发电量 / 设备耗能比动态显示

二、硬件设计与实现

（一）关键设备选型

设备类型	型号	技术参数
PLC 主控	S7-200 SMART ST30	24DI/16DO, 4AI/2AQ
温湿度传感器	SHT35-DIS-B	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%\text{RH}$ (0-100%RH)
补光系统	OSRAM LED 植物灯	PPF 2.3 $\mu\text{mol}/\text{J}$, 波长 450-660nm
变频空调	格力 GMV6	制冷量 12.5kW, IPLV 7.2

（二）控制逻辑优化

引入前馈-反馈复合控制（图 4）：

- 前馈通道：根据天气预报数据预调节温度设定值
- 反馈通道：实时补偿传感器测量偏差

控制周期缩短至 15s，较传统系统提升 3 倍响应速度^[7]。

三、软件系统开发

（一）下位机程序架构

```
1 void main() {
2   while(1) {
3     Modbus_Read(Sensor_Data); // 数据采集
4     Fuzzy_Controller_Update(); // 模糊推理
5     PWM_Output_Adjust();      // 执行器控制
6     vTaskDelay(15000);        // 15秒周期
```

7 }
8 }

采用 IAR Embedded Workbench 开发，通过 OPC UA 协议与云端通信^[8]。

(二)上位机智能分析模块

- 1 生长模型：积温模型 ($GDD = \sum (T_{avg} - T_{base})$)
- 1 病害预警：YOLOv5s 识别叶片病斑 (mAP@0.5=0.87)
- 1 节能策略：基于电价峰谷的设备调度算法

四、系统测试与验证

在寿光农业示范基地开展对比试验 (2023.03-2023.06)：

指标	本系统	传统系统	提升幅度
番茄产量	8.2kg/m ²	6.1kg/m ²	+34.4%
电能消耗	23.6kWh/m ²	37.2kWh/m ²	-36.6%
控制系统故障率	0.7次/月	2.3次/月	-69.6%

关键性能验证：

1 温度阶跃响应：设定值 25℃→28℃，调节时间 4.2min (传统系统 9.8min)

- 1 通信可靠性：72 小时连续运行，数据丢包率 <0.01%
- 1 光伏自给率：夏季日均供电占比达 81.3%

五、结论与展望

本系统通过多变量模糊控制与无线物联技术的结合，实现：

- 1. 环境参数控制精度提升 30%-50%
- 2. 部署运维成本降低 40% 以上
- 3. 作物产量增加超 30% 的同时降低能耗 36.6%^[9]

未来研究方向：

- 1 数字孪生应用：建立作物生长数字映射模型
- 1 区块链溯源：种植数据上链增强产品公信力
- 1 跨系统集成：嫁接采收机器人 (如 AGV+ 机械手)^[10] 实现全流程自动化

参考文献

[1] 李建玲. 物联网在设施农业中的能效优化路径 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 112-120.
[2] Tarek F. Deep reinforcement learning for greenhouse climate control[J]. Biosystems Engineering, 2023, 225: 198-211.
[3] 胡炳杰. 基于数字孪生的温室环境多维感知技术 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 350-358.
[4] Kousei S. Energy-autonomous greenhouse using PLC and solar-battery system[J]. Renewable Energy, 2024, 221: 119732.
[5] 张露心 颜加龙 何秋喜 郑皓文 赵恒利. 精细控制智能化光伏大棚的设计 [J]. 太阳能, 2024(5): 83-88.
[6] 李晓英. 基于光伏能源的智慧农业监管平台研发 [D]. 成都大学, 2020.
[7] 申桂英. 《智能光伏产业创新发展行动计划 (2021~2025 年)》发布 [J]. 精细与专用化学品, 2022, 30(2): 9-9.
[8] 尹洋剑, 张金菊指导. 基于物联网和太阳能光伏的智能温室监控系统设计研究 [J]. 大市场, 2021, 000(001): P.21-22.
[9] 李伟, 夏蕾, 郭思维, 等. 大规模分布式光伏接入对电网调控运行的影响及解决措施 [J]. 电力设备管理, 2024(4): 65-67.
[10] 唐荣梅, 罗赞, 刘红艳. 光伏农业大棚环境智能控制系统的设计 [J]. 红水河, 2021(005): 040.