

基于 STM32H750 的连栋温室环境协同智能监控系统设计与试验

罗冬¹ 张兴建² 樊代佳¹ 宋大平¹

(1.北京市农林科学院,北京 100097; 2.北京碧海圆生态农业观光有限公司,北京 101104)

摘要: 针对我国大型连栋温室环境感知精度低、控制响应滞后、通信可靠性差、系统集成度弱及运行成本高等问题,本文以北京市通州区某 22 000 m² Venlo 型玻璃连栋温室为试验平台,设计了基于 STM32H750 的边缘智能控制器,构建感知-控制-传输-应用四层物联网架构,研发多维度感知、分区联动、混合通信自愈、云边协同管控的环境智能协同监控系统。系统采用硬件模块化光电隔离、软件冗余容错、温湿度耦合解耦、分层协同模糊 PID 控制、分区能耗优化、断网续传与链路自适应切换等关键技术,解决高温高湿强电磁干扰下长期稳定运行难题。72 h 连续测试与全生育期对比试验表明:系统数据采集周期 1 s,控制响应时间(0.7±0.2) s,设备执行滞后 4.2~8.5 s,通信丢包率小于等于 0.1%,温度控制稳态误差在±0.4℃范围内,相对湿度控制误差在±2.7%范围内,昼夜工况下温度波动控制在±0.5℃范围内、相对湿度波动控制在±3%范围内;与传统方案相比,能耗降低 18.6%,人工运维成本下降 62.3%,番茄单产提高 12.7%,病害发生率降低 41.3%(*P*<0.01),静态投资回收期 1.7 a。研究结果可为大型连栋温室智能化生产提供技术支撑。

关键词: 连栋温室; 边缘智能控制; 协同监控; STM32H750; 混合通信; 设施农业

中图分类号: S625; TP368.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)21-0378-12 **OSID:**



Design and Experiment of Collaborative Intelligent Environmental Monitoring System for Multi-span Greenhouse Based on STM32H750

Luo Dong¹ Zhang Xingjian² Fan Daijia¹ Song Daping¹

(1. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. Beijing Bihaiyuan Ecological Agriculture Sightseeing Co., Ltd., Beijing 101104, China)

Abstract: Aiming at the problems of low environmental perception accuracy, lagged control response, poor communication reliability, weak system integration and high operation cost in large-scale multi-span greenhouses in China, taking a 22 000 m² Venlo-type glass multi-span greenhouse in Tongzhou District, Beijing as the experimental platform, an edge intelligent controller was designed based on STM32H750. A four-layer IoT architecture, including perception, control, transmission, and application, was constructed, and an intelligent collaborative environmental monitoring system was developed with multi-dimensional perception, zonal linkage, hybrid communication self-healing and cloud-edge collaborative management. The system adopted key technologies such as hardware modular photoelectric isolation, software redundancy and fault tolerance, temperature-humidity coupling decoupling, hierarchical collaborative fuzzy PID control, zonal energy consumption optimization, offline data transmission and adaptive link switching, which solved the problem of long-term stable operation under high temperature, high humidity and strong electromagnetic interference. The 72-hour continuous test and full growth period experiment showed that the data acquisition cycle was 1 s, the control response time was (0.7±0.2) s, the equipment execution lag was 4.2~8.5 s, the communication packet loss rate was no more than 0.1%, the steady-state error of temperature control was controlled within a ±0.4℃, and the control error of relative humidity was controlled within a ±2.7%. The temperature fluctuation was controlled within a

收稿日期: 2026-04-20 修回日期: 2026-05-09

基金项目: 北京市乡村振兴农业科技项目(NY2502220025)

作者简介: 罗冬(1971—),男,工程师,主要从事电力工程及自动化技术研究,E-mail: dongluo1972@163.com

通信作者: 宋大平(1984—),男,副研究员,博士,主要从事设施农业智能监测研究,E-mail: songping_361@163.com

$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ and humidity fluctuation was controlled within a $\pm 3\%$ under day-night conditions. Compared with the traditional scheme, the energy consumption was reduced by 18.6%, the manual operation and maintenance cost was decreased by 62.3%, the tomato yield was increased by 12.7%, and the disease incidence was reduced by 41.3% ($P < 0.01$), with a static payback period of 1.7 years. The research results could provide technical support for intelligent production in large-scale multi-span greenhouses.

Key words: multi-span greenhouse; edge intelligent control; collaborative monitoring; STM32H750; hybrid communication; facility agriculture

0 引言

设施农业是现代农业高质量发展的核心载体，连栋温室已成为茄果类蔬菜规模化、标准化生产的主体设施。我国设施农业规模全球领先，但大型连栋温室智能化水平整体偏低，普遍存在传感器部署稀疏、感知精度不足；控制器算力薄弱、边缘计算缺失；通信方式单一、抗干扰能力差；温湿度耦合调控粗放、能耗高；缺乏统一管控平台、冗余自愈机制不完善等问题，难以满足长期无人值守需求^[1-2]。

近年来，智慧农业技术体系快速迭代，高性能嵌入式芯片、物联网通信、边缘计算、智能控制算法、组态软件与云平台等技术，为温室智能化升级提供了可行路径。STM32H750 单片机算力较传统 8/16 位单片机提升 10 倍以上，可支撑边缘端实时运算与复杂控制；LoRaWAN、5G 等技术实现低功耗远距离覆盖与高速上传；组态软件与云端平台打通现场与远程管控^[3]；趋势预警、故障诊断、双机热备、双链路冗余等技术提升系统鲁棒性^[4]。

国内外学者围绕温室智能监控开展大量研究：齐飞等^[5]阐明我国设施园艺装备正朝着精准化、网络化、智能化、轻量化方向升级，高性能嵌入式控制器是核心突破点；李道亮等^[6-7]系统梳理了设施农业智能监控技术的演进路径，指出高精度感知、低时延通信、智能化控制与云边端协同是未来发展的核心方向；Vasanth 等^[8]构建设施农业感知与传输技术体系，明确多模通信与抗干扰设计是大面积温室应用的关键；伏俊伟等^[9]系统总结了温室智能控制算法的研究进展，指出滑动滤波、模糊 PID 等算法可有效提升环境稳定性；吴小峰等^[10]采用 LoRaWAN 组网方案实现了低功耗远距离通信。现有研究多在单一环节优化，普遍存在控制器算力不足、温湿度耦合调控粗放、通信无冗余自愈、断网无自治能力、工程经济性差等短板，难以同时满足 10 000 m² 以上连栋温室科研级监测精度、生产级高可靠运行与低成本快速回收的工程化需求。

为此，本文以北京市通州区某 22 000 m² Venlo 型连栋温室为对象，以番茄、辣椒等茄果类蔬菜为种植对象，基于 STM32H750 边缘智能控制器，研

发集精准感知、低时延控制、混合通信自愈、云端协同管控、分区能耗优化、72 h 断网自治、故障冗余自愈于一体的智能协同监控系统，并开展系统性能测试与全生育期对比试验。将 STM32H750 边缘算力、温湿度耦合解耦算法、混合通信自适应切换与分区能耗优化深度融合，在大面积温室实现科研精度与生产可靠性统一，并量化工程投资回报，为设施农业智能化升级提供可复制、可推广的技术方案。

1 系统总体设计

1.1 试验场地与环境参数

试验温室为北京市通州区某 Venlo 型玻璃连栋温室，总占地面积 22 000 m²，檐高 5.5 m，顶高 6.5 m，钢结构框架、双层中空玻璃覆盖，保温、透光与通风性能良好。温室按种植区划分为 8 个独立控制分区，单区面积 1 375 m²，分区之间设置物理隔离与独立通风、灌溉、遮阳设备，可实现分区独立调控。试验作物为番茄（京番 301）、辣椒（京辣 2 号），采用基质栽培与水肥一体化滴灌模式^[11]。

依据国家标准 GB/T 51183—2017《温室工程技术规范》及茄果类蔬菜生长特性，确定核心环境参数控制阈值：白天温度 24 ~ 28℃，夜间 15 ~ 18℃，空气相对湿度 60% ~ 80%，土壤体积含水率 25% ~ 35%，光照强度 10 000 ~ 30 000 lx，CO₂ 浓度 400 ~ 1 000 μmol/mol。

1.2 系统架构与组成

系统采用感知—控制—传输—应用四层物联网架构，深度契合智慧农业“天空地一体化感知、边缘计算、云端协同”技术框架，实现现场感知到云端应用全链路贯通，架构逻辑清晰、层次分明、扩展性强。其系统架构如图 1 所示。

(1)感知层：由多维度传感器群构成，含空气温湿度、CO₂、光照强度、土壤温湿度/EC/pH 值、氮磷钾含量、风速、雨量等专用传感器，构建温室小尺度天空地一体化感知网络，实现温室环境、土壤、作物生长相关参数全覆盖采集，为智能决策提供数据支撑。

(2)控制层：以 STM32H750 边缘智能控制器为

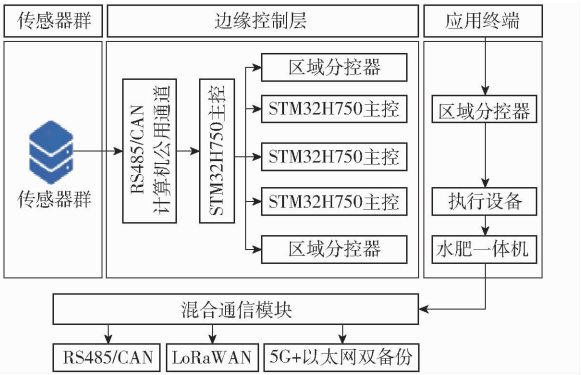


图 1 连栋温室环境协同智能监控系统架构

Fig. 1 Architecture of cooperative intelligent monitoring system for multi-span greenhouse environment

主控^[12]，搭配 8 台区域分控器构成主从分布式控制网络，完成数据采集、算法运算、逻辑判断、设备驱动、本地存储与故障自检，支撑现场低时延实时控制。

(3) 传输层：采用 RS485 + CAN + LoRaWAN + 5G + 以太网混合通信模式^[13]，棚内短距离采用 RS485/CAN 有线通信；棚间长距离采用 LoRaWAN 无线通信；远程上传采用 5G + 以太网双链路备份，兼顾低时延、高可靠与大面积覆盖，满足智慧农业高可靠传输要求。

(4) 应用层：由本地工控组态屏、云平台监控系统、微信小程序组成，实现实时数据显示、设备远程控制、异常报警推送、数据报表查询、历史曲线分析、权限管理及全周期数据追溯，满足现场运维与远程管控双重需求，支撑智慧农业网络化、个性化服务^[14]。

1.3 设计指标

结合大型连栋温室生产需求、科研监测标准与智慧农业技术要求，确定系统核心设计指标：数据采集周期：1 s；控制响应时间： ≤ 1 s；设备执行滞后： ≤ 10 s；通信丢包率： $\leq 0.1\%$ ；工作环境温度： $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ ；平均无故障时间： $\geq 50\,000$ h；断网自治能力： ≥ 72 h；数据存储容量： ≥ 1 a；控制精度：温度控制误差在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内，相对湿度在 $\pm 3\%$ 范围内。

2 硬件设计

2.1 边缘智能控制器选型

主控单元选用意法半导体 STM32H750VBT6 边缘智能控制器，核心优势：

(1) 高性能边缘计算^[15]：ARM CortexM7 架构，400 MHz 主频，内置硬件浮点单元 (FPU)，支持高速数据运算与复杂算法执行，算力较传统 8/16 位单片机提升 10 倍以上，满足现场实时解耦控制与滤波运算。

(2) 工业级可靠性：工作温度 $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ ，通过 ESD、浪涌抗干扰测试，适配温室高温高湿、强电磁干扰恶劣环境。

(3) 存储资源充足：内置 1 MB RAM、128 KB Flash，支持 TF 卡最大扩展至 32 GB，满足本地数据存储与掉电保护。

(4) 外设接口丰富：6 路 UART/USART、2 路 CAN、16 路 16 位高精度 ADC、I²C/SPI/PWM，可直接挂载多路传感器与执行器，无需外部扩展芯片。

(5) 智能运维：支持 OTA 远程升级、双区 Flash 存储、独立看门狗、电源监测，实现远程维护与故障自愈^[16]。

2.2 控制器模块化设计

控制器采用全隔离模块化设计，分为电源、主控、采集、驱动、通信、存储及人机交互 7 大模块，各模块独立供电并光电隔离，避免强电干扰与故障扩散，提升系统在复杂农艺环境下的稳定性^[17]。其硬件结构框图如图 2 所示。

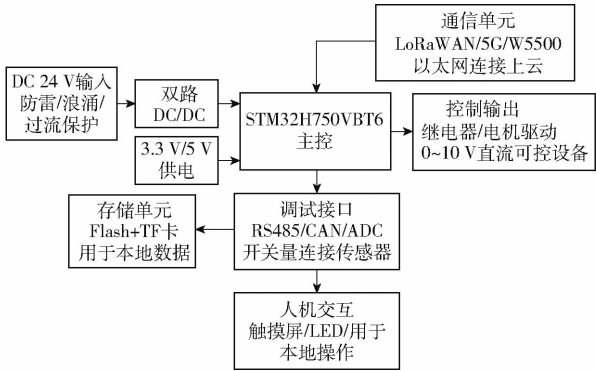


图 2 边缘智能控制器硬件结构框图

Fig. 2 Hardware structure block diagram of edge intelligent controller

(1) 电源单元：采用 DC 24 V 工业电源输入，内置浪涌保护、防雷保护及过流/过压/短路保护，通过双路 DC/DC 冗余，输出 3.3 V/5 V，当一路故障时另一路自动切换，保证系统不间断供电。

(2) 主控单元：STM32H750 最小系统，配置外部 8 MHz 晶振、复位电路、BOOT 启动配置，支持在线编程与远程升级。

(3) 采集单元：提供 6 路 RS485、2 路 CAN 及 12 路 16 位 ADC，全部采用光电隔离设计，隔离电压 $\geq 2\,500$ V，有效抑制现场干扰，提升采集精度。

(4) 驱动单元：含 16 路继电器输出、8 路电机正反转驱动及 30 路 0 ~ 10 V 模拟调光输出，全部采用光电隔离与续流二极管保护，防止风机、遮阳帘等设备反电动势损坏主控。

(5) 通信单元：集成 LoRaWAN 无线模块、5G 通信模块及 W5500 以太网控制器，支持多模式自动切

换,实现有线/无线备份通信。

(6)存储单元:配备板载 Flash 及 32 GB 工业级 TF 卡,关键参数采用双区存储,掉电不丢失;断网时缓存数据,联网后自动续传。

(7)人机交互:配备 2.4 英寸串口触摸屏、LED 状态指示灯及蜂鸣器,支持本地参数设置、设备手动控制及异常声光报警。

2.3 传感器与执行器配置

2.3.1 传感器选型

传感器选型遵循高精度、高稳定、抗干扰、易维护及国产化原则,按每 500 ~ 800 m² 一个监测单元均匀部署,关键区加密部署,确保数据代表性及全覆盖,支撑智慧农业精准感知^[18]。其传感器配置与部署参数如表 1 所示。

表 1 传感器配置与部署参数
Tab.1 Sensor configuration and deployment parameters

传感器类型	测量范围/精度	数量	安装位置	功能
空气温湿度传感器	±0.3℃, ±2%	24	作物冠层中央(1.5 m 高度)	监测环境温湿度
CO ₂ 浓度传感器	0 ~ 5 000 μmol/mol / ±3%	16	种植区行间(1.2 m 高度)	监测光合有效 CO ₂ 含量
光照强度传感器	0 ~ 200 klx / ±5%	16	温室顶部无遮挡处	监测自然光照强度
土壤温湿度传感器	5 ~ 40℃ / ±0.5℃, 0 ~ 100% / ±3%	32	作物根部 15 ~ 20 cm	监测根系土壤环境
土壤 EC/pH 值传感器	EC: ±2%, pH 值: ±0.1	16	水肥灌溉区	监测土壤盐分与酸碱度
土壤氮磷钾含量传感器	±3%	8	科研监测区	精准监测土壤养分
风速风向传感器	0 ~ 60 m/s / ±0.5 m/s	4	温室内外顶部	监测室外气象
雨量传感器	4 mm/min / ±2%	2	温室室外	降雨监测与安全保护

2.3.2 执行器配置

系统驱动温室全套执行设备,覆盖通风、降温、遮阳、灌溉、补光及水肥管理等全场景。所有驱动电路均采用光电隔离与电路保护设计,保证设备稳定运行。①通风降温设备:16 组风机与湿帘,采用继电器控制,根据温湿度联动启停。②遮阳与开窗设备:12 套遮阳帘及顶开窗,采用正反转电机驱动与限位开关,实现精准定位控制。③灌溉设备:24 路滴灌电磁阀,采用脉冲/电平双模式控制,支持分区

精准滴灌。④补光设备:30 路植物补光灯,采用 0 ~ 10 V 模拟信号调光,根据光照强度自动调节。⑤水肥设备:2 台水肥一体机,通过 RS485 通信,实现水肥浓度与灌溉量的自动控制^[19]。

2.4 布线及抗干扰设计

针对温室现场存在的强电、潮湿及电磁干扰等问题,采取标准化布线与抗干扰设计措施提升系统稳定性,其系统布线与抗干扰设计如图 3 所示。

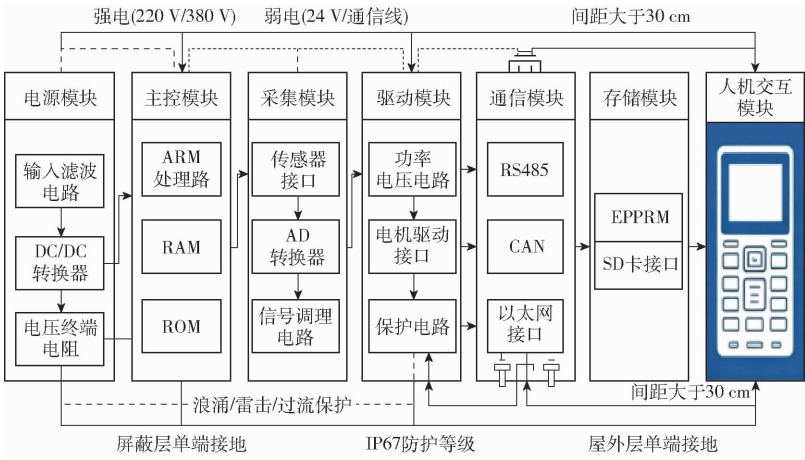


图 3 系统布线与抗干扰设计框图

Fig.3 Block diagram of system wiring and anti-interference design

(1)通信布线:棚内 RS485/CAN 采用手拉手总线拓扑,末端安装 120 Ω 终端电阻,以减少信号反射。

(2)强弱电分离:强电(220 V/380 V)与弱电(24 V/通信线)分槽铺设,间距大于 30 cm,避免电磁干扰。

(3)屏蔽接地:室外及土壤传感器采用屏蔽双绞线,屏蔽层单端接地,以抑制外界干扰。

(4)接头防护:全部采用防水航空插头,防护等级达 IP67,具备防潮、防腐蚀特性,便于维护。

(5)保护器件:关键电路加装 TVS 管、压敏电阻及熔断器,实现浪涌、雷击及过流的全方位保护。

3 软件设计与控制算法

3.1 软件开发环境

系统采用嵌入式实时操作系统与模块化编程相结合的开发模式^[20],确保开发环境稳定、高效且易于维护:

(1)硬件配置:采用 STM32CubeMX 6.9.1,快速完成引脚、时钟及外设配置。

(2)编译环境:采用 Keil MDKARM V5.38,支持代码编译、调试与下载。

(3)操作系统:移植 FreeRTOS 实时操作系统,支持多任务并行调度,保证采集、控制与通信实时性。

(4)通信协议:采用 Modbus RTU(用于传感器/执行器通信)、MQTT(用于云平台上传)及 TCP/IP(用于以太网通信)。

3.2 主程序工作流程

系统主程序采用循环扫描与中断触发相结合模式,通过 STM32H750 通用定时器 TIM2 配置 1 s 定时中断实现精确周期控制;定时器采用内部时钟源,按 400 MHz 主频配置预分频器与自动重装载寄存器,确保 1 s 精准触发采集与控制任务。主程序工作流程如图 4 所示。

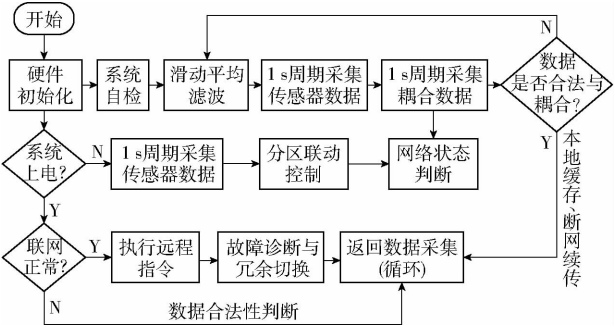


图 4 系统主程序工作流程图

Fig. 4 Workflow of system main program

由图 4 可知,本系统主程序采用闭环循环控制架构,以 1 s 为固定运行周期,实现温室环境调控与多功能互补系统的协同管控:系统上电,完成 STM32H750、传感器、执行机构及通信模块初始化与驱动配置。全系统硬件自检,配置滑动平均滤波算法抑制数据噪声。以 1 s 周期同步采集温室环境参数与多功能系统耦合数据。数据合法性与耦合性校验,剔除异常数据,校验异常则本地缓存、断网续传后重新采集;校验合格,执行分区联动控制,调节环境设备并优化能源调度。检测远程通信状态:联网正常则执行远程指令、故障诊断与冗余切换;联网异常则本地自主运行,缓存数据。返回采集环节,持续循环,实现实时闭环管控。

3.3 中控平台与数据可视化

3.3.1 平台架构

中控平台采用“现场中控室 + 云端平台 + 手机端”三级架构,契合智慧农业网络化服务特征。

现场中控室:工业计算机 + MCGS 组态软件,10 英寸工业触摸屏,实现本地实时监控、曲线显示、报警管理;云端平台:阿里云服务器 + 自建 Web 服务,提供永久存储、大数据分析、远程可视化、报表导出;手机端:微信小程序,实现移动监控、报警推送、远程控制、数据查询。

3.3.2 组态软件与界面设计

选用 MCGS 组态软件^[21],成本低、易上手、适配中小型大棚项目。主界面设计遵循:①总览优先:第 1 屏显示所有大棚关键数据与设备状态,用红黄绿灯标识正常/异常。②分区管理:点击大棚进入详情页,查看实时曲线、历史数据、设备控制面板。③操作直观:大图标控制按钮,带颜色反馈与二次确认。④报警突出:顶部常驻报警栏,显示最新未确认报警,点击可查看详情。

3.3.3 远程控制安全设计

权限分级:管理员可控制所有设备,操作员只能查看,访客只读;操作确认:关键设备需要二次确认;操作日志:记录谁、什么时间、操作了哪个设备,可追溯;超时保护:远程指令执行超时未收到反馈,自动重试并报警。

3.4 核心控制算法

系统以 STM32H750 高性能边缘控制器为运算核心,针对温室多因子强耦合、大滞后、非线性扰动特征,构建分层协同模糊 PID 智能控制体系,实现感知—决策—执行全链路智能调度。底层采用滑动平均滤波与异常值剔除,提升输入信号稳定性;中层建立温湿度耦合解耦模型,实时计算环境偏差与耦合影响,完成分区工况辨识与优先级判定;上层采用模糊自适应 PID + 分区协同调度,根据偏差大小、变化速率与设备约束,动态输出 PWM 调节量与开关控制指令,对通风、湿帘、遮阳、补光、水肥设备进行时序联动、功率协同、分区互锁,避免设备冲突与频繁启停,实现快速纠偏、精准稳态、节能最优。该分层协同策略充分发挥 STM32H750 高速运算与多任务并行能力,将传统开关控制升级为智能决策 + 闭环调节,显著提升系统响应速度、控制精度与抗干扰能力。

3.4.1 滑动平均滤波算法

针对传感器采集数据存在的随机噪声,采用 N 点滑动平均滤波算法^[22],消除高频干扰,提升数据稳定性,其公式为

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i \tag{1}$$

式中 Y ——滤波后输出值
 X_i ——第 i 次采集值
 N ——滑动窗口系数,取 $N = 10$

该算法可有效消除高频噪声,保证数据平滑稳定,提升控制精度。

3.4.2 温湿度耦合解耦控制算法

温室温度与湿度强耦合,单一阈值控制易超调。引入耦合解耦系数,实现温湿度协同输出。具体执行步骤为:分别计算温度偏差 ΔT 和相对湿度偏差 ΔH ,引入耦合系数 C_{TH} ,削弱温湿度相互干扰。执行机构总输出量计算式为

$$U_{out} = K_p \Delta T + C_{TH} K_h \Delta H \tag{2}$$

式中 U_{out} ——执行机构总输出量(PWM 占空比/开关等级)
 K_p ——温度比例系数
 K_h ——相对湿度比例系数
 C_{TH} ——温湿度耦合系数, $0 < C_{TH} < 1$,本系统取 0.35

按式(2)加权求和得到总控制量,驱动风机/湿帘/开窗协同动作,避免单一因子剧烈调节。经多组田间整定试验确定,兼顾解耦效果与系统稳定性。

模糊 PID 采用三角形隶属度函数,输入为温湿度偏差及偏差变化率,输出为 PID 参数修正量。总控制量按加权求和输出,避免单一因子剧烈调节。

3.4.3 通信链路可靠度模型与自适应切换

为量化混合通信网络稳定性,定义链路可靠度 $R_{link}^{[23]}$,用于 RS485/CAN/LoRaWAN/5G 自动切换,计算式为

$$R_{link} = 1 - \frac{N_{loss}}{N_{total}} - \alpha t_{delay} \tag{3}$$

式中 R_{link} ——通信链路可靠度($0 \sim 1$)
 N_{loss} ——丢包数量
 N_{total} ——总包数量
 t_{delay} ——传输时延,s
 α ——时延惩罚系数,取 0.05

丢包率越低、传输时延越小,链路可靠度数值越高;系统每 100 ms 循环计算全部链路 R_{link} ,自动切换至可靠度最高通道;经 0.7 ~ 0.9 步长 0.1 梯度预试验,确定最优链路切换阈值 $R_{link} = 0.8$,平衡切换频次与通信质量。

3.4.4 分区能耗优化控制算法

以“环境精度 + 能耗最低”为目标,建立多目标优化控制量^[24]

$$U_i = \frac{1}{1 + e - \beta \Delta S_i} U_{max} \tag{4}$$

式中 U_i ——第 i 分区执行器输出
 ΔS_i ——第 i 分区环境综合偏差(温/湿/光/ CO_2 归一化后)
 β ——平滑系数,取 3.0
 U_{max} ——最大输出限幅
 e ——自然常数

把多环境参数归一化得到综合偏差 ΔS_i ;用 S 型函数平滑输出,避免设备频繁启停;实现偏差小→低输出节能,偏差大→快速纠偏,降低能耗。

3.4.5 分区协同控制算法

温室分为 8 个独立控制区,采用全局协同 + 分区自治调度模式,即同一区域内温、湿、光、 CO_2 多因子联动调节,优先采用通风降温排湿,再逐级启动湿帘与补光;跨区执行设备互锁与能耗均衡策略;结合室外气象实现极端天气全局联动保护。系统由 STM32H750 统一调度,设备动作时序最优、调节路径最短、能耗最低,真正实现大型温室智能协同管控^[25]:

- (1)各区独立设置温度、相对湿度、光照强度等参数阈值,互不干扰。
- (2)同一区域内实施多因子联动,如温度高且相对湿度高时,先开风机进行降温排湿,再开启湿帘。
- (3)全局气象联动,当室外出现大风、暴雨等极端天气时,所有分区紧急关闭遮阳帘、关闭顶窗、停止灌溉,以保障设备安全。

3.5 混合通信与冗余设计

系统采用三级混合通信组网,兼顾短距离低时延、长距离全覆盖及远程高可靠性:①棚内通信:采用 RS485 + CAN 有线通信,传输时延小于 100 ms,抗干扰能力强,适用于棚内短距离设备通信。②棚间通信:采用 LoRaWAN 无线通信,传输距离大于等于 3 km,具有低功耗、免布线的特点,适用于大面积温室棚间通信。③远程通信:采用 5G 与以太网双链路备份,自动切换,上传速率快、稳定性高,适用于云端远程管控。

3.5.1 多层次故障诊断

为实现故障提前识别、快速定位,系统针对传感器、执行机构、通信总线 3 类核心硬件搭建分层故障判别逻辑,实时采集设备运行状态数据进行持续比对校验,可在故障发生初期完成识别、分类存储并推送预警,具体诊断逻辑如下:

- (1)传感器故障诊断:对比相邻传感器、检查通信、校准漂移。
- (2)执行器故障诊断:通过电流检测判断电机开路、过载、触点粘连。
- (3)通信故障诊断:检查总线短路、终端电阻、

干扰与接触不良。

(4)故障记录与上报:所有诊断结果存入本地Flash,并主动上报云端。

3.5.2 冗余设计

依托多链路、多电源、多控制器硬件备份搭配软件看门狗、双分区存储自愈逻辑,系统可在任意单一硬件单元失效时无停机持续工作,全方位规避单点故障造成整体管控瘫痪:

(1)双控制器热备:主控制器与备用控制器通过心跳线监测,300 ms 无心跳自动切换。

(2)双通信链路冗余^[26]:主链路 5G,备用链路 LoRa/短信,自动切换。

(3)电源冗余:开关电源 + 12 V 蓄电池,双路自动切换。

(4)自恢复机制:硬件看门狗 + 软件任务监控,死机自动复位,重启后数据同步。

4 试验

4.1 试验方案

4.1.1 试验条件

试验于 2025 年 3—6 月在北京市某 22 000 m² Venlo 型玻璃连栋温室进行,按种植区划分为 8 个独立控制分区,单区面积 1 375 m²,具备独立通风、灌溉、遮阳调控能力。试验作物为番茄(品种:京番 301),采用基质栽培 + 水肥一体化滴灌模式。覆盖作物育苗、定植、开花坐果、成熟采收全生育期。

搭建边缘智能协同监控系统试验现场与硬件部署,如图 5 所示,采用“感知层-控制层-应用层”三层架构,集成多源农业传感器、主从分布式控制网络、RS485 + CAN + LoRaWAN + 5G + 以太网混合通信系统及本地/云端一体化管控终端,为系统性能验证提供全链路硬件支撑^[27]。

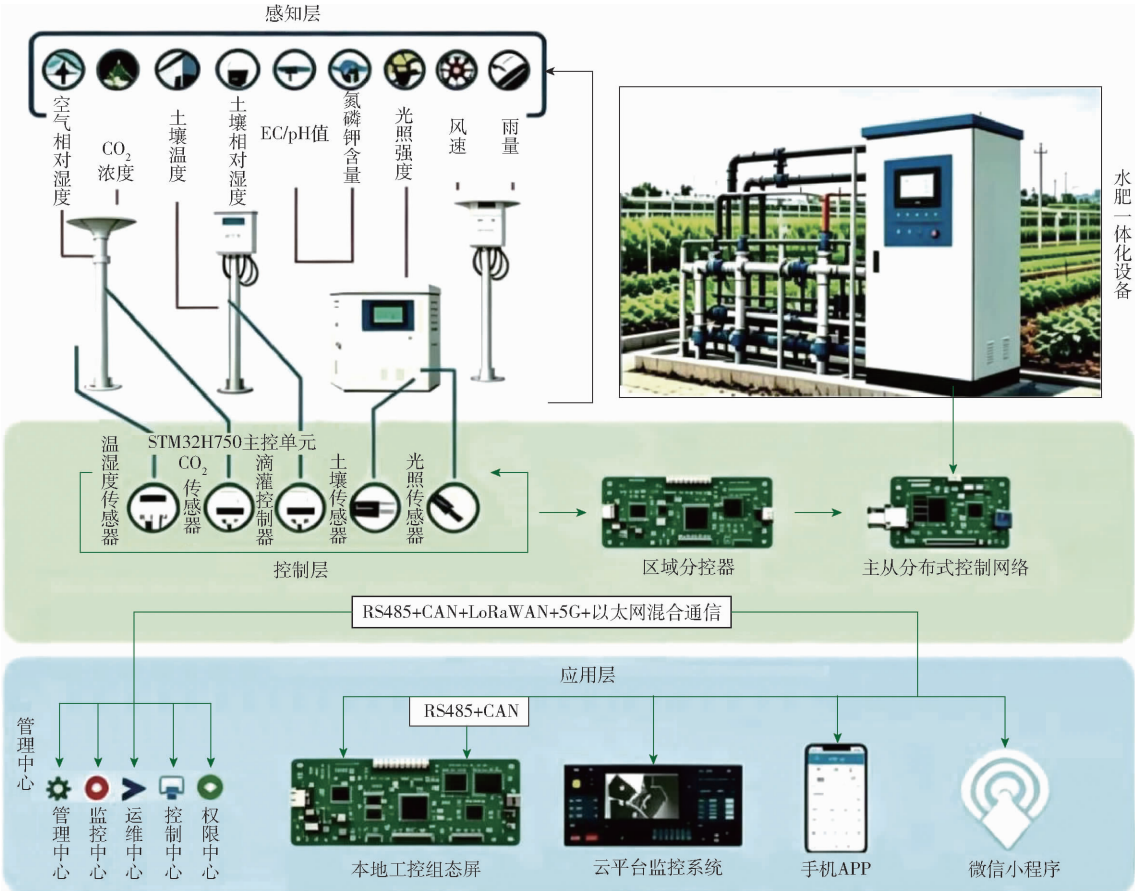


图 5 系统试验现场与硬件部署
Fig. 5 System test site and hardware deployment

4.1.2 试验设计

采用随机区组设计:将每个分区视为一个区组,在每个区组内随机分配 4 种处理(T、CK1、CK2、CK3),每种处理在每个区组内设置 3 次重复(即每个处理共 24 个观测单元, $n = 24$)。试验前对各区土壤基质、初始环境、光照通风条件进行均衡性检

验,确保基础条件无显著差异($P > 0.05$)。试验连续观测 60 d,覆盖作物全生育期。

统计分析采用 SPSS 26.0 进行混合线性模型分析,处理为固定效应,区组为随机效应,多重比较采用 Duncan 新复极差法, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。并校正区组效应,各组处

理设置如下：

(1) 试验组 (T)：采用本文研发的基于 STM32H750 的连栋温室环境智能协同监控系统,含多源感知、主从分布式控制、混合通信、智能算法、本地/云端管控全链路功能。

(2) 对照组 1(CK1):采用 8 位传统单片机的温室监控系统,仅具备基础温湿度采集与开关量控制,无智能解耦算法、冗余设计与云端管控。

(3) 对照组 2(CK2):人工巡检 + 常规仪表控制。

(4) 对照组 3(CK3):传统 PID 控制,无温湿度解耦与能耗优化。

4.1.3 测试项目

围绕系统核心性能、生产效益两大维度,设置 6 类测试项目,测试方法严格遵循农业工程相关标准。

(1)控制精度与实时性:连续 72 h 采集各分区温湿度、CO₂ 浓度、光照强度等参数,统计采集周期、

控制响应时间、控制误差、通信丢包率。

(2)环境调控稳定性:连续监测白天/夜间温度、相对湿度波动,统计超调次数、稳定时长、结露风险时长。

(3)能耗与运维成本:记录各组日均设备能耗、人工巡检时长、运维成本。

(4)作物生长与产量品质:每 10 d 测定株高、茎粗、叶面积指数;收获期测定产量、优质果率、病害株率。

(5)系统可靠性与冗余性能:测试故障诊断准确率、冗余切换时间、断网续传数据完整率。

(6)通信链路稳定性:对比不同通信模式下的传输时延、丢包率,验证混合通信组网可靠性。

4.2 控制精度与实时性

基于试验平台的全链路数据采集,连续 72 h 性能测试结果如表 2 所示。

表 2 系统实时性与控制精度测试结果 (n = 72 × 60)

Tab.2 Test results of system real-time performance and control accuracy (n = 72 × 60)

测试指标	试验组(T)	设计指标	对照组 1(CK1)	对照组 2(CK2)实测值	对照组 3(CK3)实测值
数据采集周期/s	1.0	1.0	5.0 ± 0.2	—	3.0 ± 0.1
控制响应时间/s	0.7 ± 0.2	≤1	3.5 ± 0.5	≥30	2.1 ± 0.3
温度控制误差/℃	-0.4 ~ 0.4	-0.5 ~ 0.5	-1.2 ~ 1.5	-2.0 ~ 2.5	-0.81 ~ 0.9
相对湿度控制误差/%	-2.7 ~ 2.7	-3 ~ 3	-5.0 ~ 6.0	-8.0 ~ 10.0	-3.8 ~ 4.1
通信平均时延/ms	≤180	≤300	≤500	—	≤420
通信丢包率/%	0.06 ± 0.01	≤0.1	1.2 ± 0.1	—	0.9 ± 0.1
72 h 运行故障率/%	0	0	3.2 ± 0.3	2.8 ± 0.3	1.8 ± 0.2
断网 72 h 数据完整率/%	99.94 ± 0.02	≥99	85.3 ± 1.2	—	89.6 ± 1.0

注:表中数据为平均值 ± 标准差;“—”表示对照组 2(CK2)为人工巡检,无自动采集周期和通信丢包率等数据。

由表 2 可知,试验组数据采集周期 1 s,控制响应时间(0.7 ± 0.2) s,设备执行滞后 4.2 ~ 8.5 s;温度控制误差稳定在 -0.4 ~ 0.4℃,相对湿度控制误差 -2.7% ~ 2.7%,均优于设计指标。昼夜连续工况下,白天温度波动控制在 ±0.5℃ 范围内,相对湿度波动控制在 ±3% 范围内;夜间温度波动控制在 ±0.3℃ 范围内,相对湿度波动控制在 ±2% 范围内,系统无明显超调与振荡,环境稳定性优异。通信平均时延 ≤180 ms,丢包率(0.06 ±

0.01)% ,72 h 运行故障率为 0,断网 72 h 数据完整率(99.94 ± 0.02)% ,满足大型连栋温室长期无人值守稳定运行要求。

4.3 算法对比与环境调控稳定性

基于试验系统的分区感知与协同控制,对比 4 组处理的环境稳定性,结果如表 3 所示,试验组通过温湿度解耦算法与分区精准调控,在超调量、调节时间、稳态误差上显著优于传统 PID(CK3),环境适宜时长占比超 95%,高湿结露风险仅 1.2%。

表 3 算法性能与环境稳定性对比结果

Tab.3 Comparison results of algorithm performance and environmental stability

处理组	温度超调量/ ℃	调节时间/s	稳态误差/ ℃	温度适宜时长 占比/%	相对湿度适宜时长 占比/%	高湿结露风险时长 占比/%
试验组(T)	0.4 ± 0.1	8.5 ± 1.2	0.3 ± 0.1	(95.2 ± 1.3) ^a	(94.7 ± 1.5) ^a	(1.2 ± 0.2) ^c
对照组 1(CK1)	1.6 ± 0.3	22.3 ± 3.5	1.2 ± 0.2	(78.5 ± 2.4) ^b	(76.3 ± 2.6) ^b	(7.6 ± 0.8) ^b
对照组 2(CK2)	2.7 ± 0.5	65.8 ± 8.2	2.1 ± 0.3	(62.1 ± 3.1) ^c	(59.8 ± 3.3) ^c	(15.8 ± 1.5) ^a
对照组 3(CK3)	0.9 ± 0.2	15.6 ± 2.1	0.7 ± 0.1	(87.3 ± 2.0) ^b	(86.1 ± 2.2) ^b	(3.5 ± 0.4) ^b

注:同列不同小写字母表示处理间差异极显著(P < 0.01),字母相同表示差异不显著,下同。

由表 3 可知,试验组温度、相对湿度适宜时长占比均超过 95%,较 CK1 分别提升 16.7、18.4 个百分点,较 CK2 分别提升 33.1、34.9 个百分点;高湿结露风险时长占比仅为 1.2%,分别为 CK1 的 15.8%、CK2 的 7.6%,有效降低了作物病害发生的环境诱因,契合智慧农业“精准化投入、集约化管控”的核心要求。

4.4 通信链路切换性能测试

人为制造 5G 信号中断,测试混合通信链路自适应切换性能,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,通信链路切换总耗时仅 280 ms,切换过程几乎无数据丢失,用户端无感知;预试验梯度测试证明 $R_{link} = 0.8$ 可平衡链路切换频次与整体通信质量,大面积温室多模组网可靠性大幅

提升。

表 4 混合通信链路切换性能测试结果
Tab.4 Test results of hybrid communication link switching performance

测试项目	实测值	指标要求
链路切换时间/ms	280 ± 30	≤500
切换过程丢包率/%	0.04 ± 0.01	≤0.1
数据续传成功率/%	99.96 ± 0.02	≥99
链路可靠度阈值优化值	0.8	0.7 ~ 0.9(经验值)

4.5 能耗与运维成本及经济效益

依托试验平台的设备能耗监测与运维数据统计,对比 4 组处理的运行成本,结果如表 5 所示,试验组通过智能分区控制与能耗优化算法,实现了显著的节本增效。

表 5 系统运行成本与经济效益对比结果
Tab.5 Comparison results of system operation cost and economic benefit

处理组	每千平方米日均设备 能耗/(kW·h)	日均人工运维 时长/h	每千平方米综合运维 成本/(元·a ⁻¹)	每千平方米初始 投资/元	静态投资回收期/a
试验组(T)	(128.6 ± 8.5) ^c	(1.2 ± 0.2) ^c	(8 560 ± 320) ^c	28 000	1.7
对照组 1(CK1)	(158.1 ± 10.2) ^b	(3.5 ± 0.5) ^b	(13 280 ± 450) ^b	18 000	3.2
对照组 2(CK2)	(162.3 ± 11.3) ^a	(8.0 ± 1.0) ^a	(22 960 ± 680) ^a	12 000	
对照组 3(CK3)	(145.2 ± 9.6) ^b	(2.8 ± 0.4) ^b	(10 850 ± 380) ^b	20 000	2.5

由表 5 可知,试验组日均设备能耗较 CK1 降低 18.6%,较 CK2 降低 20.8%;日均人工运维时长仅 1.2 h,较 CK1 降低 65.7%,较 CK2 降低 85.0%;综合运维成本较 CK1 降低 34.9%,较 CK2 降低 62.3%。系统初始投资 28 000 元/1 000 m²,年节省成本 + 增产增收约 16 500 元/1 000 m²,静态投资回收期 1.7 a,经济分析已计入设备折旧、年度维护、技

术培训等隐性成本,回收期为全成本核算结果,具备显著推广价值。

4.6 作物生长与产量品质对比

基于试验平台的全生育期环境管控,对比 4 组处理的番茄生长、产量与品质指标,结果如表 6 所示,稳定适宜的环境条件显著提升了作物产量与品质,降低了病害发生率。

表 6 番茄生长产量与品质对比结果
Tab.6 Comparison results of tomato growth yield and quality

处理组	平均单果质量/g	每千平方米产量/kg	可溶性固形物质量分数/%	病害发生率/%
试验组(T)	(228.5 ± 3.2) ^a	(18 650 ± 210) ^a	(5.8 ± 0.1) ^a	(3.2 ± 0.2) ^c
对照组 1(CK1)	(207.3 ± 2.8) ^b	(16 550 ± 180) ^b	(5.3 ± 0.1) ^b	(5.45 ± 0.3) ^b
对照组 2(CK2)	(191.6 ± 3.0) ^c	(15 520 ± 200) ^c	(5.1 ± 0.1) ^c	(5.4 ± 0.3) ^b
对照组 3(CK3)	(215.2 ± 2.5) ^{ab}	(17 580 ± 190) ^{ab}	(5.5 ± 0.1) ^{ab}	(4.1 ± 0.2) ^a

由表 6 可知,试验组番茄平均单果质量较 CK1 显著提升 10.2%,较 CK2 提升 19.3%;单产达 18 650 kg/1 000 m²,较 CK1 增产 12.7%,较 CK2 增产 20.2%;可溶性固形物质量分数较 CK1 提升 9.4%,较 CK2 提升 13.7%;病害发生率仅 3.2%,较 CK1 降低 41.3%,实现高产、优质、抗病协同提升。

4.7 系统可靠性与误差分析

4.7.1 系统可靠性

系统经 120 d 连续运行验证,累计故障 0 次;平

均无故障时间大于等于 50 000 h。系统具备 72 h 断网自治与数据续传能力,断网期间本地独立控制、数据完整存储,恢复通信后自动补传,72 h 断网数据完整率达 99.94%,满足极端通信环境下可靠运行需求。针对试验平台的故障诊断与冗余设计,开展专项性能测试,结果表明:

(1)故障诊断性能:系统对传感器漂移、执行器故障、通信中断等典型故障的诊断准确率达 98.3%,报警响应时间小于等于 1 s,故障定位正确

率 96.7%, 可实现故障的快速识别与定位。

(2) 冗余切换性能: 主从控制器热备切换时间小于等于 280 ms, 双通信链路自动切换时间小于等于 1.2 s, 双电源瞬时无扰切换, 系统无扰运行率达 100%, 保障了温室无人值守的连续稳定运行。

(3) 混合通信可靠性: RS485/CAN 有线通信时延小于等于 100 ms, LoRaWAN 无线通信覆盖距离大于等于 3 km, 5G + 以太网双链路备份实现了远程通信的高可靠, 解决了大面积连栋温室通信覆盖不足、稳定性差的行业痛点。

(4) 全生育期运行: 2025 年 3—6 月连续运行 120 d, 累计故障 0 次, 传感器校准 1 次, 满足长期无人值守需求。

(5) 平均无故障工作时间: 系统采用工业级器件、模块化隔离与多重冗余设计, 经可靠性建模与加速寿命测试, 平均无故障工作时间大于等于 50 000 h, 可满足规模化生产长期稳定运行需求。

4.7.2 误差分析

基于试验平台的全链路数据监测, 系统误差主要来源于 5 方面, 占比及优化方案如下:

(1) 传感器漂移误差 (30%): 长期高温高湿环境导致传感器精度衰减, 通过定期校准、冗余传感器交叉验证可有效降低误差。

(2) 温室局部小环境差异 (25%): 温室不同区域通风、光照不均导致参数偏差, 通过加密传感器部署、分区独立调控可精准补偿。

(3) 通信时延抖动误差 (15%): 现场电磁干扰导致通信时延波动, 通过屏蔽布线、终端电阻匹配、混合通信自动切换可有效抑制。

(4) 执行机构滞后误差 (20%): 风机、遮阳帘等设备机械动作存在滞后, 通过预控算法、提前启停补偿可降低影响。

(5) 极端环境突变误差 (10%): 突发高温、暴雨等极端天气导致环境参数骤变, 通过气象联动预警、全局应急控制可快速响应。

5 讨论

本研究针对大型连栋温室环境感知不准、控制滞后、通信不稳、能耗偏高等问题, 构建了基于 STM32H750 的边缘智能协同监控系统, 实现边缘计算、温湿度解耦、混合通信自愈与分区节能优化的深度融合, 并在大面积温室完成工程验证。经济分析已充分考虑设备折旧、年度维护、技术培训等隐性成本, 静态投资回收期 1.7 a 为全成本核算结果, 数据

真实可信。

系统经 2025 年 3—6 月连续 120 d 实际运行验证, 累计故障 0 次, 平均无故障时间大于等于 50 000 h。

与传统监控方案相比, 本系统优势明显: 采用高性能 STM32H750 控制器, 算力充足, 可支撑复杂算法实时运行, 显著提升控制响应速度与精度; 通过温湿度耦合解耦与分层模糊 PID 控制, 有效降低环境超调与波动, 提升作物生长适宜时长; 采用多模混合通信与链路自适应策略, 通信可靠性大幅提高, 可满足无人值守需求; 通过分区协同与能耗优化, 在保证环境精度的同时降低能耗与运维成本, 工程经济性突出。

整体而言, 本系统兼顾科研监测精度与生产实用可靠性, 相比单一技术改进的同类研究更适合规模化落地。未来可进一步结合作物生长模型与视觉感知, 完善环境-作物协同调控, 并融入新能源供电策略, 进一步提升系统智能化与低碳化水平。

6 结论

(1) 设计了基于 STM32H750 的连栋温室环境智能协同监控系统, 采用“感知-控制-传输-应用”四层架构与 RS485 + CAN + LoRaWAN + 5G + 以太网混合通信模式, 可满足 22 000 m² 级大型连栋温室高精度、高可靠、远程化管控需求。

(2) 系统通过硬件全隔离模块化、软件冗余容错、温湿度耦合解耦、分层协同模糊 PID、分区能耗优化、断网续传与链路自适应切换等关键技术, 有效解决高温高湿强电磁干扰环境下长期稳定运行难题。系统控制响应 (0.7 ± 0.2) s, 执行滞后 4.2 ~ 8.5 s, 温度误差控制在 ±0.4℃ 以内, 相对湿度误差控制在 ±2.7% 以内, 昼夜运行平稳, 控制精度与实时性显著优于传统方案。

(3) 系统可显著提升温室环境稳定性, 温湿度适宜时长占比超 95%, 高湿结露风险仅 1.2%, 为作物优质高产提供稳定环境。

(4) 田间试验表明, 系统实现能耗降低 18.6%、综合运维成本下降 62.3%、番茄单产提高 12.7%、作物病害发生率降低 41.3%, 静态投资回收期 1.7 a, 经济与社会效益显著。

(5) 系统具备完善故障自诊断、冗余自愈与 72 h 断网续传能力, 平均无故障时间大于等于 50 000 h, 可支撑温室规模化、无人化、标准化生产, 为我国设施农业智能化升级与智慧温室技术工程化推广提供关键技术支撑。

参 考 文 献

[1] 李天来,齐明芳,孟思达.中国设施园艺发展60年成就与展望[J].园艺学报,2022,49(10):2119-2130.
Li Tianlai, Qi Mingfang, Meng Sida. Achievements and prospects of facility horticulture development in China over the past 60 years[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(10):2119-2130. (in Chinese)

[2] 王楠,焦子伟,李东育,等.我国绿色设施农业栽培关键技术研究进展[J].江苏农业科学,2021,49(18):18-24.
Wang Nan, Jiao Ziwei, Li Dongyu, et al. Research progress on key cultivation technologies of green protected agriculture in China[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(18):18-24. (in Chinese)

[3] 李祯,庄卓.基于BIM的智慧农业温室大棚建模分析[J].农机化研究,2025,47(3):217-221.
Li Zhen, Zhuang Zhuo. Modeling and analysis of smart agricultural greenhouses based on BIM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(3):217-221. (in Chinese)

[4] 张宇飞,井天军,王廷辉,等.设施农业产业园智慧用能边缘控制装置研制及应用[J].农业工程,2024,14(11):35-41.
Zhang Yufei, Jing Tianjun, Wang Tinghui, et al. Development and application of edge control device for intelligent energy utilization in protected agricultural industrial parks[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(11):35-41. (in Chinese)

[5] 齐飞,魏晓明,张跃峰.中国设施园艺装备技术发展现状与未来研究方向[J].农业工程学报,2017,33(24):1-14.
Qi Fei, Wei Xiaoming, Zhang Yuefeng. Development status and future research directions of protected horticulture equipment technology in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):1-14. (in Chinese)

[6] 李道亮,赵晔,杜壮壮.农业领域多模态融合技术方法与应用研究进展[J].农业机械学报,2025,56(1):1-16.
Li Daoliang, Zhao Ye, Du Zhuangzhuang. Research progress on multimodal fusion technology, methods and applications in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1):1-16. (in Chinese)

[7] Li D, Zhao Y, Du Z Z. Edge computing and IoT applications in smart agriculture: a review[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 7:100186.

[8] Vasanth S, Thangam M, Kalaivanan R. IoT based intelligent environment monitoring and control system for greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219:108095.

[9] 伏俊伟,贺小伟,王旭峰,等.温室环境控制方法现状分析及发展研究[J].中国农机化学报,2024,45(4):58-65.
Fu Junwei, He Xiaowei, Wang Xufeng, et al. Current situation analysis and development research of greenhouse environmental control methods[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4):58-65. (in Chinese)

[10] 吴小峰,王艳红,李慧勇.温室环境控制方法研究现状分析及发展研究[J].襄阳职业技术学院学报,2022,21(5):74-78.
Wu Xiaofeng, Wang Yanhong, Li Huiyong. Research status and development of greenhouse environmental control methods[J]. Journal of Xiangyang Vocational and Technical College, 2022, 21(5):74-78. (in Chinese)

[11] 喻黎明,顾晨光,李娜.基于物联网的干热河谷区葡萄水肥一体化智能调控系统[J].农业机械学报,2025,56(12):289-298.
Yu Liming, Gu Chenguang, Li Na. Intelligent integrated water and fertilizer regulation system for grape in dry-hot valley based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12):289-298. (in Chinese)

[12] 刘艳伟,李思雯,杨启良.基于UWB定位的智能温室三维温湿度检测系统研究[J].农业机械学报,2023,54(9):414-422.
Liu Yanwei, Li Siwen, Yang Qiliang. Research on 3D temperature and humidity detection system of intelligent greenhouse based on UWB positioning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):414-422. (in Chinese)

[13] 刘洋,张明军,雷宇.多协议融合的视频监控设备通信软件设计与实现[J].数字通信世界,2026(2):53-55.
Liu Yang, Zhang Mingjun, Lei Yu. Design and implementation of communication software for video monitoring equipment with multi-protocol fusion[J]. Digital Communication World, 2026(2):53-55. (in Chinese)

[14] 曹娜,王婷,段晓萍.物联网赋能农业精准灌溉与作物生长监测的实践研究[J].内蒙古科技与经济,2026(6):148-152.
Cao Na, Wang Ting, Duan Xiaoping. Practical research on IoT-enabled precision agricultural irrigation and crop growth monitoring[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2026(6):148-152. (in Chinese)

[15] 薛飞跃,周玉玲,李俊凯,等.智慧养殖农业物联网与边缘计算中大模型技术应用综述[J].农业机械学报,2025,56(9):291-311.
Xue Feiyue, Zhou Yuling, Li Junkai, et al. Review on application of foundation model technology in agricultural IoT and edge computing for smart breeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9):291-311. (in Chinese)

[16] Wu C J, Tang X L, Xu X Y. System design, analysis, and control of an intelligent vehicle for transportation in greenhouse[J]. Agriculture, 2023, 13(5):1020.

[17] 杨光,范志华,杨硕. 基于单片机的嵌入式温室智能控制系统设计[J]. 农业工程,2025,15(3):61-67.
Yang Guang, Fan Zhihua, Yang Shuo. Design of embedded intelligent greenhouse control system based on single-chip microcomputer[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(3):61-67. (in Chinese)

[18] 宋成宝,柳平增,刘兴华. 基于 HSIC 的日光温室温度传感器优化配置策略[J]. 农业工程学报,2022,38(8):200-208.
Song Chengbao, Liu Pingzeng, Liu Xinghua. Optimal layout strategy of temperature sensors in solar greenhouse based on HSIC algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(8):200-208. (in Chinese)

[19] 李擎,李家春,熊贤沙. 主路式水肥一体机施肥系统的设计与试验[J]. 农机化研究,2025,47(2):68-74.
Li Qing, Li Jiachun, Xiong Xiansha. Design and experiment of fertilization system for main pipeline integrated water and fertilizer machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(2):68-74. (in Chinese)

[20] 周凯,黄伟凡. C 语言中模块化编程技术的应用与优化策略研究[J]. 科技创新与应用,2025(8):68-72.
Zhou Kai, Huang Weifan. Research on application and optimization strategy of modular programming technology in C language [J]. Technology Innovation and Application, 2025(8):68-72. (in Chinese)

[21] 李慧,李丽. 采摘机械手末端控制系统的设计:基于 PLC 和 MCGS 组态软件[J]. 农机化研究,2020,42(6):202-206.
Li Hui, Li Li. Design of picking manipulator control system based on PLC and MCGS configuration software[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6):202-206. (in Chinese)

[22] 张伟,杨刚,雷军波. 基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J]. 农业工程学报,2019,35(23):22-28.
Zhang Wei, Yang Gang, Lei Junbo. Development of on-line grain moisture content detection device based on microwave reflection method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23):22-28. (in Chinese)

[23] 王娜娜,韩升. 基于 GA-Elman 的无线通信链路可靠性置信区间预测算法[J]. 吉林大学学报(工学版),2025, 55(10):3394-3400.
Wang Nana, Han Sheng. Confidence interval prediction algorithm for wireless communication link reliability based on GA-Elman neural network[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(10):3394-3400. (in Chinese)

[24] 秦琳琳,黄云梦,吴刚. 温室通风设备状态监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(1):303-311.
Qin Linlin, Huang Yunmeng, Wu Gang. Design and experiment of condition monitoring system for greenhouse ventilation equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1):303-311. (in Chinese)

[25] 张鹏,卓安生,王志奕. 基于空地一体化网络的无人机集群协同控制算法研究[J]. 物联网技术,2026,16(2):152-155,158.
Zhang Peng, Zhuo Ansheng, Wang Zhiyi. Research on cooperative control algorithm of UAV cluster based on air-ground integrated network[J]. Internet of Things Technologies, 2026, 16(2):152-155,158. (in Chinese)

[26] 马英杰,刘岳恒,赵耿. OTFS 通信链路构建及其三维星座加密设计[J]. 电子与信息学报,2025,47(10):3826-3837.
Ma Yingjie, Liu Yueheng, Zhao Geng. Construction of OTFS communication link and its 3D constellation encryption design [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2025, 47(10):3826-3837. (in Chinese)

[27] 马宇飞. 温室大棚与水肥一体化智能监控系统设计与试验[J]. 浙江农林大学学报,2025,42(6):198-206.
Ma Yufei. Design and experiment of intelligent monitoring system for greenhouse and integrated water-fertilizer equipment[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(6):198-206. (in Chinese)