

# 集装箱式植物工厂系统优化设计与集成验证

余翔宇, 操浩, 倪齐坚

福建塔洛斯科技有限公司, 福建 福州

收稿日期: 2026年9月24日; 录用日期: 2026年10月22日; 发布日期: 2026年10月30日

## 摘要

集装箱式植物工厂作为模块化、可移动的智慧农业设施, 在解决特殊环境下的蔬菜供应问题方面具有重要应用价值, 但现有方案存在空间利用率低、能耗高、环境控制精度不足等问题。本文以40英尺标准集装箱为载体, 针对上述问题, 对保温结构、循环风道系统、立体种植架及综合控制系统进行了系统优化设计。通过CFD风道模拟、有限元结构分析及实验验证, 结果表明: 优化后的系统温度控制精度达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , 湿度控制精度达 $\pm 10\% \text{ RH}$ ,  $\text{CO}_2$ 浓度控制精度达 $\pm 100 \text{ ppm}$ 。以金线莲‘红霞’为栽培对象的实验证实了系统的综合性能。本研究为移动式植物工厂的工程化应用提供了一套完整的优化集成方案。

## 关键词

集装箱植物工厂, 系统优化, 环境控制, STM32, 金线莲

# Optimal Design and Integration Verification of a Containerized Plant Factory System

Xiangyu She, Hao Cao, Qijian Ni

Fujian Talos Technology Co., Ltd., Fuzhou Fujian

Received: September 24, 2026; accepted: October 22, 2026; published: October 30, 2026

## Abstract

As a modular and mobile smart agricultural facility, the containerized plant factory has important application value in solving vegetable supply problems in special environments. However, existing solutions suffer from low space utilization, high energy consumption, and insufficient environmental control accuracy. In this study, a 40-ft standard container was used as the carrier, and systematic optimization was conducted on the insulation structure, circulating air duct system, three-dimensional planting rack, and integrated control system to address the above issues. Through CFD air duct simulation, finite element structural analysis, and experimental verification, the results showed that the optimized system achieved a temperature control accuracy of  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , a humidity

control accuracy of  $\pm 10\%$  RH, and a  $\text{CO}_2$  concentration control accuracy of  $\pm 100$  ppm. An experiment using *Anoectochilus roxburghii* 'Hongxia' as the test plant confirmed the overall performance of the system. This study provides a complete optimized integration solution for the engineering application of mobile plant factories.

## Keywords

Containerized Plant Factory, System Optimization, Environmental Control, STM32, *Anoectochilus Roxburghii*

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球人口增长与耕地减少使传统农业面临严峻挑战[1], 智慧农业已成为农业可持续发展的重要方向[2]。植物工厂可在完全受控环境下实现作物周年高效生产, 具有节水、节肥、无农药、不受气候限制等优势[2] [3]。

当前集装箱式植物工厂具有模块化、可移动、部署灵活等优势, 可部署于城市楼顶、海岛、沙漠、极地、高原等极端场景[4] [5]。目前, 国内外已有多个企业开发相关产品[6], 但高能耗、环境控制均匀性差、系统集成度低是制约其大规模推广的瓶颈[7] [8]。为此, 本文以 40 英尺标准集装箱为载体, 从保温结构、风道系统、立体种植架、综合控制系统四个方面进行系统优化设计, 并通过仿真分析与实验测试验证各子系统性能, 最终通过金线莲种植实验验证其综合生产能力, 旨在为移动式植物工厂的工程化应用提供一套系统性的优化方案。

## 2. 系统总体设计与关键子系统优化

### 2.1. 集装箱式植物工厂结构基本参数及系统组成分析

采用 40 英尺标准集装箱, 内部有效尺寸:  $10,800\text{ mm} \times 2200\text{ mm} \times 2400\text{ mm}$ 。设计目标为对温度、湿度、光照、 $\text{CO}_2$ 、水肥等参数进行综合调控, 实现作物周年连续生产。

系统由围护保温结构、循环风道与空调系统、立体种植架、全光谱 LED 光照系统、STM32 多参数环境控制器、水肥一体化循环系统及人机交互界面组成。各子系统协同工作, 形成“感知 - 决策 - 执行”的闭环控制链路。

### 2.2. 围护保温结构设计

围护保温性能直接影响植物工厂的能耗, 需对植物工厂的保温结构材料进行设计分析, 并分析保温材料的性能参数。为降低能耗, 集装箱式植物工厂选用聚氨酯挤塑板作为保温材料, 在箱体内侧六面满铺 100 mm 厚度聚氨酯保温板, 内外层密封处理。该材料密度为  $40\sim 60\text{ kg/m}^3$ , 导热系数  $\leq 0.025\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , 闭孔率  $> 93\%$ , 吸水率  $\leq 3\%$ ; 抗压强度为  $2.0\sim 2.7\text{ kg/cm}^2$ , 使用温度范围为  $-60\sim +120^\circ\text{C}$ 。其低导热系数、高闭孔率和低吸水率有利于减少围护结构热损失并提升防潮性能。

### 2.3. 循环风道结构设计

风道结构直接影响集装箱内部的温度分布及气流均匀性, 根据流体力学原理计算了风道参数并进行

了风道结构设计。针对 40 英尺集装箱纵深长(11 m)导致的气流不均问题, 本研究设计了专用的循环风道系统(图 1), 以保证箱体内温度控制的精确性和均匀性。

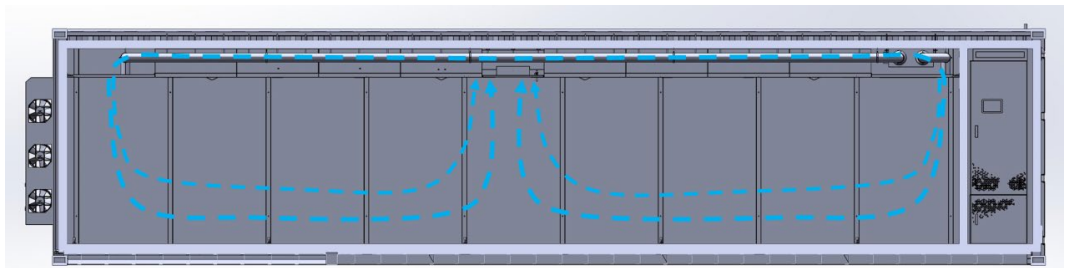


**Figure 1.** Schematic diagram of the internal air ducts and airflow circulation in a container-type plant factory  
**图 1.** 集装箱式植物工厂内部风道及风道气流循环示意图

### 2.3.1. 风道结构设计

风道设计需兼顾送风均匀性与阻力损失。根据流体力学, 风道流量、风速与截面积的关系为:

$$Q = A \times V$$

风道压强与流量、截面积及阻力系数相关, 计算公式为:

$$P = (Q \times K) \div A$$

其中  $Q$  为流量,  $A$  为风道截面积,  $V$  为风速,  $P$  为风道压强,  $K$  为阻力系数。

据此计算并确定循环风道结构: 最终采用两端送风、中部回风方式, 主风道尺寸为 1500 mm × 140 mm, 出风口间距 500 mm, 出风口风速 3 m/s, 进风口风速 6 m/s, 配置 3 台轴流风机。该结构可在保证循环风量的同时降低沿程阻力, 提高箱内气流均匀性。

### 2.3.2. 风道流体力学仿真分析

风道结构设计需满足风道风压及进出口风速的要求。为验证风道设计的有效性, 利用计算流体力学 (CFD) 软件对风道内的风压分布及进出口风速进行了模拟分析。仿真结果如图 2 所示。风压分布图显示, 风道正面平均风压约  $1.42 \times 10^3$  Pa, 背面约  $-1.30 \times 10^3$  Pa, 形成了有效的压差, 驱动气流循环。风速分布图表明, 出风口风速约 3 m/s, 进风口风速分布均匀, 无明显的涡流或死区, 证明了该风道设计能够满足箱体内气流均匀性的要求。

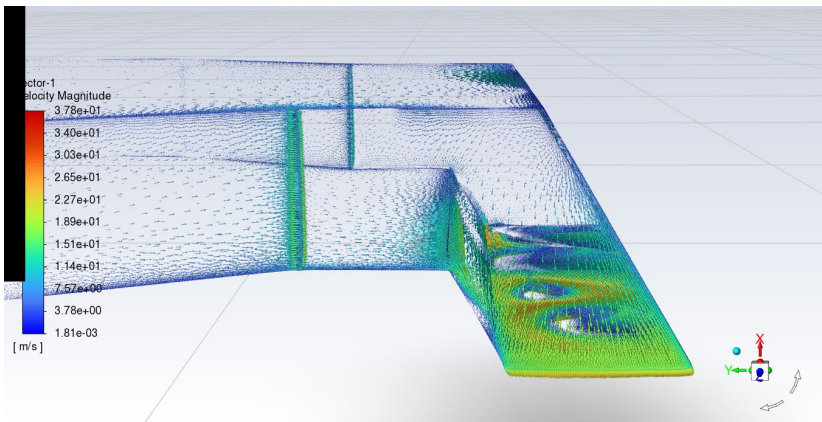


**Figure 2.** Simulation analysis of the air duct  
**图 2.** 风道仿真分析图

2.4. 立体种植架优化设计

种植架的结构形式直接影响植物工厂的空间利用率，为提高空间利用率，本系统设计了 5 层全遮光中空水培管道式种植架。每层可布置 6 条管道，每条管道设有 10 个种植孔，单次种植容量达 300 株。管道外壁采用白色反光设计以充分利用光照，内壁为黑色以阻隔光线进入营养液，中空层起到隔热保温作用，底部导流槽保证营养液均匀流动。该结构采用半开放式设计，便于种植操作。

为保证种植架的结构可靠性，利用 SolidWorks 软件对其进行了静态位移和静态应力有限元分析。分析结果显示在满载工况下，种植架的最大应力为  $5.603 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，远低于材料屈服强度( $3.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ )；最大位移为 0.87 mm，结构变形量极小，完全满足安全使用要求。

3. 综合控制系统设计与实现

3.1. 硬件架构

构建了以 STM32 微控制器为核心的“感知 - 决策 - 执行”闭环的硬件架构。感知层：通过 RS232 串口实现与触摸屏通讯，通过 RS485 总线连接温湿度、光照、CO<sub>2</sub>、pH/EC 等各类传感器，实现远距离、抗干扰的数据采集；决策层：采集的数据通过通讯电路传输到控制器，根据控制策略给出控制决策，实现对各子系统的控制；执行层：通过固态继电器(SSR)控制制冷/制热一体机、加湿/除湿设备；通过 PWM 驱动器调节 LED 灯板亮度；通过继电器控制电磁阀及水泵。实现多参数闭环调控。

3.2. 多参数控制策略

系统需对温度、湿度、光照、CO<sub>2</sub> 浓度和营养液参数进行控制，为提升控制精度和准确率，避免环境因子之间的干扰，系统采用阈值控制与 PID 复合控制相结合的策略，对各环境参数进行精准调控。详细性能指标见表 1。

Table 1. Performance indicators of control system  
表 1. 控制系统性能指标

| 控制参数               | 控制精度       | 执行机构          | 传感器类型                       |
|--------------------|------------|---------------|-----------------------------|
| 温度                 | ±1℃        | 制冷加热一体机       | IC 温度传感器                    |
| 湿度                 | ±10% RH    | 超声波加湿器/抽湿机    | 电容式湿度传感器                    |
| 光照强度               | 0~100%无极调节 | PWM 调光 LED 灯板 | 光量子传感器(PPFD)                |
| CO <sub>2</sub> 浓度 | ±100 ppm   | 电磁阀 + 钢瓶/新风   | NDIR 红外 CO <sub>2</sub> 传感器 |
| 营养液 pH             | ±0.02      | 自动配比泵         | pH 电极                       |
| 营养液 EC             | ±1.5% FS   | 自动配比泵         | EC 电极                       |

3.3. 人机交互界面设计

采用串口屏设计人机交互界面(图 3)，包括主界面(实时曲线、传感器参数、设备状态)、设置界面(参数配置)、设备状态界面、运维管理界面(调试、固件升级、数据导出)，便于操作与维护。

4. 系统集成验证与性能分析

为验证系统整体性能，基于 40 英尺集装箱搭建了完整的实验平台，并集成所有子系统。以金线莲‘红霞’为栽培对象，进行了一系列环境参数控制精度测试和植物生长实验。



Figure 3. HMI of the container plant factory control system  
图 3. 集装箱植物工厂控制系统人机交互界面

4.1. 环境参数控制精度验证

实验测试了系统在温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度及光照强度方面的控制精度，结果如表 2 所示。测试结果表明，系统各项指标均达到或优于设计目标，验证了控制策略的有效性。

Table 2. Results of environmental parameter control accuracy test  
表 2. 环境参数控制精度测试结果

| 参数                      | 设定值     | 实测均值    | 控制精度   | 判定 |
|-------------------------|---------|---------|--------|----|
| 温度(℃)                   | 25.0    | 25.3    | 优于±1   | 合格 |
| 相对湿度(%)                 | 70      | 68      | 优于±10  | 合格 |
| CO <sub>2</sub> 浓度(ppm) | 800 ppm | 780 ppm | 优于±100 | 合格 |
| 光照强度                    | 460     | 463     | 优于±5   | 合格 |

4.2. 环境控制性能测试

为进一步评估系统的运行稳定性与均匀性，对温度、湿度、光照及能耗进行了专项测试，结果详见表 3。

Table 3. Test results of system core performance indicators  
表 3. 系统核心性能指标测试结果

| 测试项目 | 测试参数    | 测试结果                                                        |
|------|---------|-------------------------------------------------------------|
| 温度性能 | 温度均匀性   | 平均温度 25.3℃，最大温差 0.8℃，满足 ≤±1℃ 要求；<br>水平方向温差 0.5℃，垂直方向温差 0.7℃ |
|      | 动态响应    | 升温(20 → 25℃)时间 55 min；<br>降温(30 → 25℃)时间 130 min；超调量 < 0.5℃ |
|      | 24 小时波动 | 波动范围 24.5~25.8℃，最大偏差 < 0.8℃                                 |

续表

|      |                       |                                                                                                                                            |
|------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 湿度性能 | 垂直分层                  | 上(1800 mm)、中(1000 mm)、下(300 mm)相对湿度分别为 65%、68%、70%                                                                                         |
|      | 加湿速率                  | 加湿 50 → 90%RH 时间 45 min                                                                                                                    |
|      | 72 小时稳定性              | ≤5%                                                                                                                                        |
| 光照性能 | 光照强度 PPFD (灯下 100 mm) | 平均光照强度 530 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 中心区域 560 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 边缘 530 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ |
|      | 不同高度光强衰减              | 灯下 50、150、200mm 处分别为 580、510、420 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$                                                                       |
|      | 光谱分析                  | 红蓝光比例约为 3:1, 符合植物生长需求                                                                                                                      |
| 能耗测试 | 能耗构成                  | 制冷系统: 1300 kWh/月; 照明系统: 1160 kWh/月; 加热系统: 1100 kWh/月; 控制系统: 43.2 kWh/月                                                                     |

由表 3 可知, 系统温度、湿度、光照的均匀性与稳定性均满足设计目标, 温度最大温差 0.8℃、湿度波动  $\leq \pm 5\% \text{RH}$ 、平均 PPFD 约 545  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 红蓝比约 3:1; 能耗主要集中在制冷、照明和加热, 三者合计占 98.8%。后续节能优化应重点聚焦围护结构保温、LED 光源光效提升及空调运行策略优化。

4.3. 金线莲生长情况测试分析

以金线莲‘红霞’品种为对象, 在设定环境下进行了 3 个批次的栽培试验。其生长指标如表 4 所示。三批次金线莲的株高、茎粗和地上鲜重均表现出良好的稳定性, 变异系数(CV)均小于 10%。其中, 株高的变异系数仅为 2.05%, 表明系统所提供的受控环境能够稳定支持金线莲的纵向生长; 茎粗的变异系数为 3.33%, 说明植株茎秆发育较为一致。地上鲜重的变异系数为 5.79%, 相对略高, 这可能与个体间根系发育、有效光合面积及养分吸收效率的差异有关, 但在人工可控环境下仍处于较低水平, 验证了系统对营养液循环和光照均匀性的调控效果良好。林下仿野生栽培条件下[9], 金线莲单株干重约为 0.2015 g, 折干率约 11.9%, 折算单株鲜重约为 1.69 g。本系统生产的金线莲平均单株鲜重达 8.29 g, 约为林下鲜重的 4.9 倍, 产量提升显著, 验证了系统优化后环境控制水平对金线莲生物量积累的促进作用。

Table 4. Growth indicators of *Anoectochilus roxburghii*

表 4. 金线莲生长指标

| 批次       | 平均株高(cm) | 平均茎粗(mm) | 单株地上鲜重(g/株) |
|----------|----------|----------|-------------|
| 批次 1     | 26.1     | 3.43     | 8.81        |
| 批次 2     | 25.3     | 3.22     | 8.19        |
| 批次 3     | 26.3     | 3.26     | 7.87        |
| 平均值      | 25.9     | 3.30     | 8.29        |
| 标准差      | 0.53     | 0.11     | 0.48        |
| 变异系数(CV) | 2.05%    | 3.33%    | 5.79%       |

三批次金线莲生长数据稳定, 且生长指标优于文献报道的传统栽培模式, 表明本系统所构建的受控环境及水肥调控系统能够有效支持金线莲的周年连续生产, 并实现高产、稳产的目标。

5. 结论

本文针对集装箱式植物工厂存在的空间利用率低、能耗高、环境控制精度不足及系统集成度差等问

题,以 40 英尺标准集装箱为载体,对保温结构、循环风道系统、立体种植架及综合控制系统进行了系统优化设计,并完成了集成验证。主要结论如下:

(1) 采用 100 mm 聚氨酯挤塑板实现六面保温,导热系数  $\leq 0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;循环风道经 CFD 模拟验证,气流均匀性满足设计要求;5 层立体水培种植架可容纳 300 株,经有限元分析结构安全可靠。

(2) 基于 STM32 微控制器,集成温湿度、光照、 $\text{CO}_2$ 、水肥多参数调控模块,实现了温度  $\pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度  $\pm 10\% \text{ RH}$ 、 $\text{CO}_2$  浓度  $\pm 100 \text{ ppm}$ 、光照 0%~100%无极调节的控制精度。

(3) 以金线莲‘红霞’为栽培对象的实验表明,平均株高 25.9 cm、茎粗 3.3 mm、地上鲜重 8.29 g/株,生长指标稳定,验证了系统的实际生产能力。

(4) 该优化方案有效提升了集装箱植物工厂的空间利用率与环境控制稳定性,为移动式植物工厂的工程化应用提供了参考。未来可进一步引入 AI 算法优化光配方与能耗调度,探索与可再生能源耦合的绿色运行模式,拓展在都市农业、边防应急、科研育种等领域的应用。

## 基金项目

福建省星火计划项目“基于多模态人工智能辅助决策系统的金线莲高效繁育技术及装备研发”(2025S0010)。

## 参考文献

- [1] 杨秉珣,董廷旭.世界耕地面积变化态势及驱动因素分析——以 21 个国家为例[J].世界农业,2017(3): 51-57,84.
- [2] Yu, Z., Bu, K., Liu, Y., Wang, A., Yuan, W., Xue, J., *et al.* (2024) Energy Examination and Optimization Workflow for Container Farms: A Case Study in Shanghai, China. *Applied Energy*, **374**, Article ID: 124038. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124038>
- [3] 林海樱.基于生命周期评价的集装箱式植物工厂碳足迹研究[D]:[硕士学位论文].杭州:浙江工业大学,2024.
- [4] 董微,马铁,张栋,等.牧草集装箱植物工厂研发与应用[J].农业工程,2022,12(6): 71-74.
- [5] 周增产,赵静,胡福生,等.草莓集装箱植物工厂设计与应用[J].农业工程,2020,10(9): 52-57.
- [6] 李东星,周增产,卜云龙,等.集装箱植物工厂研制与试验[J].农业工程,2016,6(6): 78-83+87.
- [7] 毛毛,刘东,宋睿治.集装箱植物工厂气流组织特性及优化研究[J].制冷,2022,41(3): 20-24,35.
- [8] 侯赛飞,陈杰,吴军辉,等.植物工厂节能和环境控制方法研究现状与展望[J].中国农机化学报,2026,47(4): 222-230.
- [9] 牛欢,谢卓宓,古力,等.林下种植密度和收获期对金线莲产量和品质的影响[J].中国现代中药,2018,20(7): 837-841,865.