

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.037

考虑时空变异特性的温室多环境因子优化策略

李康吉¹ 张世通¹ 孟凡跃¹ 毛罕平²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 本文考虑温室环境的时空变异特性,通过构建温室建筑计算流体力学(CFD)模型,结合带精英策略的非支配遗传算法(NSGA-Ⅱ),建立C++-Fluent联合优化框架,实现温室环境因子的多目标、高效率优化。CFD温室模型在江苏省镇江市的一处温室进行实地验证;迭代优化算法由C++实现并通过超级计算机提高计算效率;优化目标包括作物区域温度场、二氧化碳浓度分布以及控制温室风机能耗。研究表明,CFD温度场和速度场与监测点实验值吻合度高,平均相对误差分别为4.9%和7.05%;为获得某场景下作物生长温度场、二氧化碳浓度分布的最优值且维持温室风机的低能耗,温室湿帘入口温度为[296.6 K,302 K],风机出口风速为[2.9 m/s,5.5 m/s]。此时作物区域的温度场、二氧化碳浓度分布及风机能耗均在最优范围,有助于提高作物产量,降低温室能耗;超级计算机Linux系统下开发的优化方案计算效率比个人计算机大幅提高,计算时长缩短约88.09%。本文所提策略充分考虑温室环境的时空变化特性,对温室多环境因子实现多目标、高效率优化。

关键词: 温室;多环境因子;时空变异特性;优化策略

中图分类号: S625.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0343-08

OSID:



Optimization Strategy of Greenhouse Multiple Environmental Factors Considering Temporal and Spatiotemporal Variability

LI Kangji¹ ZHANG Shitong¹ MENG Fanyue¹ MAO Hanping²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Considering the temporal and spatial variation characteristics of greenhouse environment, the C++-Fluent joint optimization framework was established by constructing the greenhouse building computational fluid dynamics (CFD) model and combining the non dominated genetic algorithm with elite strategy (NSGA-Ⅱ), so as to realize the multi-objective and high-resolution optimization of greenhouse environmental factors. The CFD greenhouse model was verified by a greenhouse in Zhenjiang City, Jiangsu Province. The iterative optimization algorithm was implemented in C++ and the computing efficiency was improved by supercomputer. The optimization objectives included crop regional temperature field, carbon dioxide distribution and control of greenhouse fan energy consumption. The results showed that the CFD temperature field and velocity field were in good agreement with the experimental values at the monitoring points, and the average relative errors were 4.9% and 7.05% respectively. In order to obtain the optimal value of crop growth temperature field and carbon dioxide distribution in a certain scene and maintain low energy consumption of greenhouse fan, the greenhouse wet curtain temperature was [296.6 K, 302 K], and the fan outlet wind speed was [2.9 m/s, 5.5 m/s]. At this time, the temperature field, carbon dioxide distribution and fan energy consumption in the crop area were in the optimal range, which helped to improve crop yield and reduce greenhouse energy consumption. The computing efficiency of the optimization scheme developed under the supercomputer Linux system was significantly higher than that of the personal computer, and the computing time was shortened by about 88.09%. The strategy proposed fully considered the temporal and spatial variation characteristics of greenhouse environment and realized high-resolution and high-efficiency optimization of multiple environmental factors in greenhouse, which can provide a basis for the selection of greenhouse environmental parameters suitable for crop growth.

Key words: greenhouse; multiple environmental factors; spatiotemporal variability; optimization strategy

收稿日期: 2020-11-18 修回日期: 2021-02-07

基金项目: 中国博士后特别项目(2018T110457)

作者简介: 李康吉(1979—),男,教授,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: likangji@ujs.edu.cn

0 引言

温室环境是非线性、多变量、高耦合的复杂系统,作物培育可以根据室外气象条件和作物生长发育各个阶段所需环境,利用控制设备进行合理调控,进而得到整体的环境参数优化方案,从而高效、均衡、快速地生产各种作物^[1-3]。

文献[4-5]利用计算流体力学(CFD)研究温室环境和通风问题,并取得较好的结果。随着计算机性能的发展和湍流模型的不断完善以及更多数值模型的建立,计算流体力学成为国内外研究温室动力学的一种新的有力工具,BOULARD等^[6]运用太阳辐射模型并考虑温室内作物,研究温室微气候和作物蒸腾情况,所得结果与实验值吻合较好。文献[7-8]采用CFD软件建立了有植物条件下的湿帘机械通风三维模拟模型,对不同天气条件和种植密度温室内温度分布模式进行了三维数值模拟与预测,探讨不同通风模式下温室热环境分布状况。在温室环境模型建立中,单因子的研究起到了积极的作用,SIGRIMIS等^[9]通过动态积温法分别对短期和长期的温度进行优化,年均节能可达到9%。但是单独调整某个因子时,总是离不开其他相关因子的影响,作物很难获得最优培育环境条件。因此,BARTZANAS等^[10]、周伟等^[11]研究不同通风配置、日光辐射对温度、湿度、二氧化碳等环境因素的影响。当某一环境因素发生改变时,必须考虑因素之间的相互影响^[12]。张雪花等^[13]运用灰色多目标粒子群对温室内部的温度、湿度、能耗进行多目标调控,结果表明该方法可以有效控制温湿度,同时可降低温室能耗。人工CFD仿真对多组控制参数进行模拟优化调节温室通风、遮阳、二氧化碳参数的方法计算效率低,求解过程冗杂。文献[14]提出了一种基于GenOpt的双目标优化方法,并通过Hooke-Jeeves和粒子群优化算法的实现,研究了建筑围护结构设计对建筑采光和热性能两个目标的影响。孙耀杰等^[15]提出基于宽-深神经网络的两级温室环境数据融合算法,在保证决策精度的同时丰富了可融合特征类别,进一步提升温室融合系统的智能化程度。胡瑾等^[16]提出了基于离散曲率算法的温室CO₂优化调控模型,具有高效节能特点,为设施作物CO₂高效精准调控和节本增效提供了理论基础。LAMMARI等^[17]提出了一种复杂温室气候模型,运用遗传算法(GA)对温度和蒸气压优化的方法,使得温室模型参数达到最优。张军华等^[18]研究基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律。本文采取基于超级计算机进行CFD模拟与多目标优化

遗传算法相结合的方法,选取温室内部温度、二氧化碳浓度分布以及温室能耗为目标,湿帘入口温度和风机出口处风速为控制变量进行优化调节,并进行实地实验验证。

1 实验与CFD建模

1.1 实验温室

实验温室位于江苏省镇江市丹徒区,位于东经119.20°,北纬32.20°,属于亚热带季风气候区。温室长40 m,宽18 m,顶高5 m,面积720 m²,屋脊为南北走向3跨度,每跨度6 m,温室四周和顶部覆盖材料为透光度高于89%的浮法玻璃,北墙装备3个负压风机,南墙装有湿帘入口。实验与建模时,选择正北方向为X轴负方向,正东方向为Z轴正方向,向上为Y轴正方向,建立笛卡尔坐标系。

实验时间为2017年5月5日中午,测试期间天气晴好或多云,室外温度为32℃,风机出口风速为2 m/s,风向为南风,风力3~4级。

1.2 实验方法

温室外采用HT-8983型热敏式风速测量仪测量风速风向和气温,采用光照度变送器测量太阳辐射强度,保持测量仪器置于开阔处,无遮挡。温室内部温度测量仪器沿着南北方向和垂直高度方向两个方向进行布点放置,选用TP402型低功耗无线温度测量器采集温度,实验现场布置图如图1所示。在南北方向上距离湿帘入口一侧间隔8、16、24、32 m布置,东西方向上正对风机出口距离西墙间隔3、7、15 m布置,高度分别为0.5、2、3 m,共有36个温度观测点。



图1 温度测量器现场布置图

Fig. 1 Site layout of temperature measuring device

温室内风速测量仪器选用WS-A2型三维超声波风速风向测量仪,在南北方向上距离进气口一侧间隔2、10、20、30、38 m布置,东西方向上正对第

1 个和第 2 个风机出口距离西墙间隔 3、7 m 布置, 高度分别为 0.6、1.7 m, 实验现场如图 2 所示。

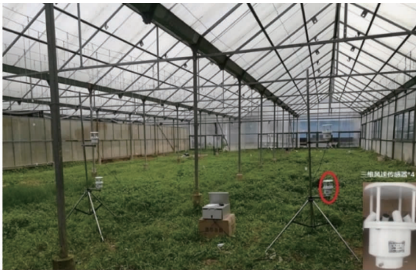


图 2 风速测量器现场布置图

Fig. 2 Site layout diagram of air velocity measuring device

由于温室面积较大, 实验过程需要进行长时间、多次数的数据采集, 故采用无线数据记录仪 T3 采集和显示数据, 该仪器支持远程定时定点自动采集并保存室内环境数据。

1.3 温室 CFD 建模与模型验证

在构建 CFD 模型时, 考虑到该工况下温室侧窗、南墙的门处于关闭状态, 风机向室外排风, 室内形成负压, 室外空气从湿帘被吸入温室。模型总体比较简单, 但是包含着一些特殊设置(湿帘窗户、负压风机、遮阳帘、地面), 所以总体网格划分无需过于密集, 但是需要对特殊设置进行加密。温室网格划分如图 3 所示。

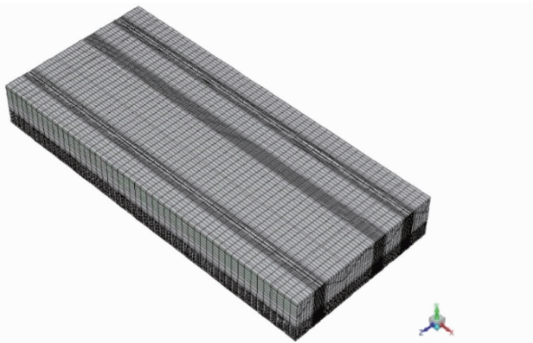


图 3 温室网格划分图

Fig. 3 Grid division diagram of greenhouse

1.3.1 模型选取

温室内空气流速较低, 并且流动过程中空气温度变化范围不大, 其通风过程可视为定常不可压缩流体运动。温室内气体流动遵循质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程三大方程^[19], 其通用形式为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}) + S_\phi \quad (1)$$

式中 ϕ ——通用变量

Γ_ϕ ——扩散系数

S_ϕ ——广义源项

温室气流存在明显的冷热对流, 具有较高的湍流特性, 考虑模型特点及精确度, 采用标准 $k-\epsilon$ 模型进行求解。温室内空气与二氧化碳混合气体的对

流和扩散采用组分传输模型。辐射传热是温室内热量传递的主要形式, 考虑到对温室温度场准确性的要求, CFD 的辐射模型采用 Discrete Ordinates (DO) 模型, 本文根据温室地理位置和实验时间自动获取温室太阳辐射总量。

1.3.2 边界条件设置

温室屋顶、侧墙与室内外空气通过传导、对流和辐射方式进行能量交换。在模拟机械通风工况时, 温室采取负压通风的方式, 湿帘进气口处温度设为定值。湿帘入口处的风速由负压风机决定, 因此其边界条件设置为压力边界。同样对于温室的风机出口, 考虑其为负压风机, 故将其设置为速度边界, 根据风机出口处实际风速进行设置。模拟所用的土壤、空气、气象条件等基本参数以及温室相关边界条件设置如表 1 所示。

表 1 模型基本参数及边界条件设置

Tab. 1 Basic parameters and boundary conditions of model

参数	数值
室外温度/°C	27
室内屋顶温度/°C	33
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.22
空气导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.25 × 10 ⁻²
玻璃密度/(kg·m ⁻³)	2.4 × 10 ³
塑料导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.58
土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 900
土壤导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.0
室内 CO ₂ 质量比	1.18 × 10 ⁻⁴
室外 CO ₂ 质量比	3.80 × 10 ⁻⁴

1.3.3 模型验证

图 4 为机械通风条件下观测点的温度仿真值与实验值比较, 仿真结果与实验数据基本吻合且变化规律一致, 最大相对误差和平均相对误差分别为 10.12% 和 4.9%; 由于速度的测量受外界影响较大, 以及测量仪器的误差范围较大, 局部仿真值与实验值吻合不是非常好, 平均相对误差为 7.05%。数

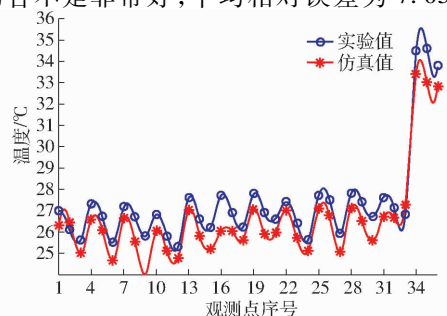


图 4 温度仿真值与实验值比较

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental temperature values

值结果能够真实反映温室内环境分布,本研究所建立的 CFD 模型以及边界条件设置是有效的。

2 环境因子优化方法

2.1 夏季温室环境因子分布

Venlo 型玻璃温室具有良好的透光性、密封性、通风性,其内部温湿度、光照强度及浓度等环境因子相互耦合,共同影响温室作物生长,且对温室作物的产量与品质起到至关重要的作用^[20]。夏季华东地区高温天数多,温室内部温度高且分布不均匀,对夏季作物生长影响较大。目前湿帘风机降温方法是使用最为广泛和有效的技术,具有效果显著、经济可靠的优点^[21]。湿帘风机系统的核心是能让水均匀地淋湿整个降温湿帘墙,空气穿透湿帘时,与湿润表面进行的水气交换使空气的显热转化为汽化潜热,实现对空气的加湿与降温。温室作物光合作用消耗大量二氧化碳,会导致温室内二氧化碳含量不足。调整空气中二氧化碳的含量以增强光合作用,对促进作物生长同样重要。当前温室系统环境参数的调控大都假定参数分布均匀,很少考虑温度、二氧化碳浓度等参数的空间分布对作物生长、能量消耗的影响。

在温室系统中考虑作物区域的温度场、二氧化碳分布情况,同时期望温室能耗最低,这属于一类多目标优化问题。由于此类问题涉及复杂环境系统的大规模建模和求解,对计算能力要求高,目前仍缺乏通用的优化方案。

2.2 多目标优化算法

多目标优化是指多个相互关联的目标在给定区域内同时最佳的优化问题。遗传算法因为其不基于梯度,采用随机优化,广泛用于参数优化类问题^[22]。文献[23]针对多目标优化中各个目标之间冲突,不能同时达到各个目标最优的问题,进一步提出非支配遗传算法(NSGA)。在此基础上,NSGA-II 算法采用了快速非支配排序、最优保留和精英策略保持种群的多样性,使准 Pareto 域中的个体能均匀分布到整个 Pareto 域,同时降低了算法的复杂度,提高了运算速度和鲁棒性,在非连续数据空间、离散型控制变量的优化求解中效果显著。

NSGA-II 算法流程图如图 5 所示。在本文温室环境多因子的优化方案中,选取在机械通风模式下的湿帘入口温度和风机出口风速为温室控制变量,选取温度适宜性、二氧化碳浓度分布均匀性和风机能耗等参数作为优化目标。

2.3 优化框架搭建

以优化作物生长环境并节约温室耗能为目标,

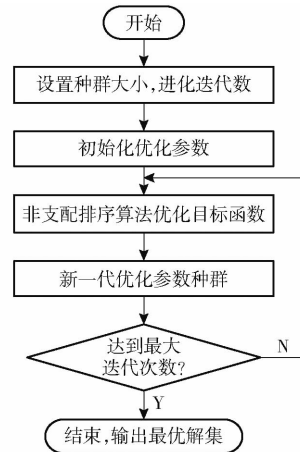


图 5 NSGA-II 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of NSGA-II algorithm

采用 NSGA-II 算法,搭建考虑时空变异特性的温室多环境因子优化方案。采用 Fluent 18.0 软件建立温室环境系统 CFD 模型,采用 C++ 编程实现 NSGA-II 算法以及与 CFD 模型的数据交互。具体优化过程如下:

(1) 建立 CFD 仿真模型。建立温室模型,设置边界条件和材料参数,验证模型精度,保存 case 和 data 工程文件,用于仿真求解。

(2) 创建批处理文件。根据 Fluent 软件的文本用户界面(TUI)功能,编写 journal 文件,用于 Fluent 18.0 顺序执行命令:读取工程文件,导出温室内部环境参数结果。创建批处理脚本文件,用于调用 Fluent 18.0 自动读取 journal 文件进行仿真。

(3) NSGA-II 初始化。设置 NSGA-II 多目标优化算法人口数、进化代数和控制变量选取范围,编写温室环境因子优化目标评价函数。

(4) 交互式寻优。NSGA-II 优化开始,由 NSGA-II 给出的控制变量值生成新的 journal 文件,运行批处理脚本启动 Fluent 读取新的 journal 文件进行一次仿真,然后读取 Fluent 该次迭代仿真的环境参数数值结果,用于计算优化目标评价函数,并记录每次优化时控制变量值、优化目标函数值与温室内部特征环境参数值。

(5) 保存结果。若 NSGA-II 多目标优化算法未满足优化条件则执行步骤(4)继续优化,若满足优化条件则保存最优解,记录最优控制变量,优化结束。优化流程如图 6 所示。

2.4 超级计算机配置

为保证优化结果的准确性,每次优化迭代均需利用 CFD 模型求解温室环境响应,这对计算机的运算能力要求很高。本文采用“神威·太湖之光”超级计算机,使用 Linux 操作系统实现上述多目标优化

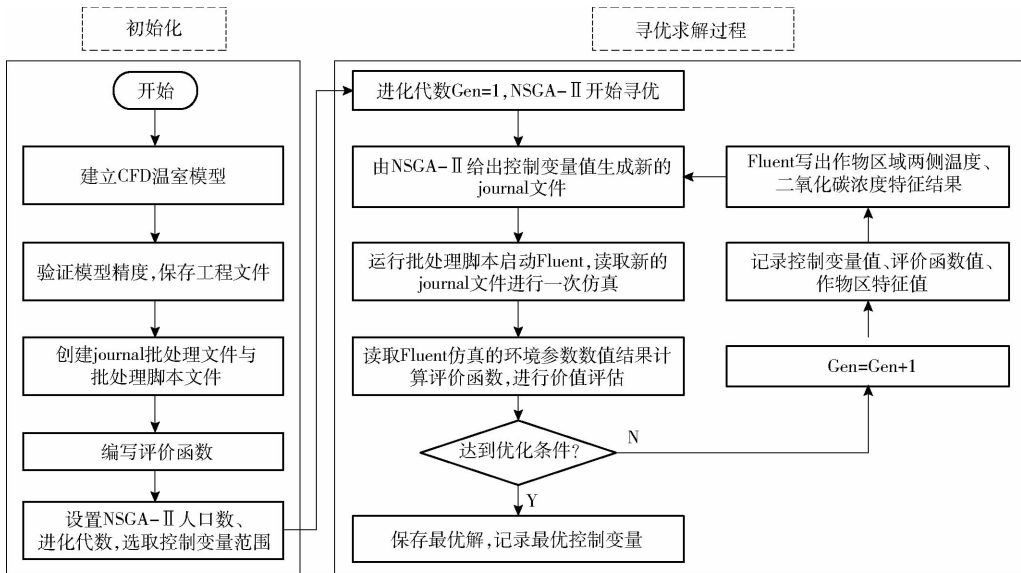


图 6 优化流程图

Fig. 6 Optimization flow chart

方案,优化过程中,通过创建 shell 批处理脚本调用 Fluent 软件的 journal 文件对温室环境进行迭代求解。超算系统可通过 SSH 协议远程登陆,数据通过 FTP 或 SCP 方式远程传输。

使用个人计算机,设置 NSGA - II 多目标优化算法,人口数为 200,迭代次数为 5,对温室环境参数优化计算耗时约 690 h,相同设置下使用超级计算机求解耗时约 82.14 h,计算时长缩短约为 88.09%。表 2 为个人计算机与超级计算机配置。

表 2 个人计算机与超级计算机配置

Tab.2 Personal computer and supercomputer configuration

参数	个人计算机	超级计算机
CPU	Intel i5	神威 26010
核心数目	8	48
内存/GB	8	128
搭载系统	Windows 10	Linux
仿真平台	Fluent 18.0	Fluent 18.0

3 结果与分析

3.1 温室性能评估指标

使用所提出的方案优化作物区域内的温度和二氧化碳浓度的分布。温室内温度的理想值设定参考基于作物生长模型的变温管理技术,图 7 为变温管理技术温度曲线,在 11:00 到 13:00 处于光合适温阶段,应保持较高温度,促进生成光合产物,选取温室内理想温度为 30℃。参照文献[24]对夏季茄科茄属植物生长模型的研究,温室内最优二氧化碳浓度设定主要取决于作物光合速率、二氧化碳损耗速率、室内温度以及成本,由时间与温度关系、不同二氧化碳浓度下作物光合

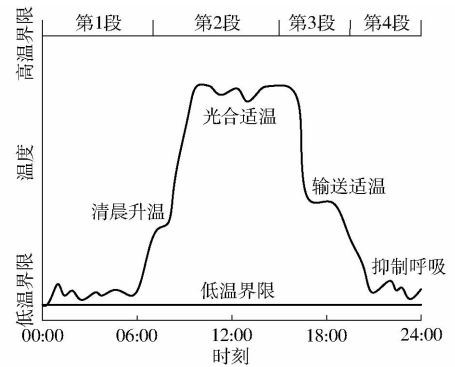


图 7 基于变温管理技术的温度基准曲线

Fig. 7 Benchmark curve of temperature based on alternating temperature husbandry

作用总量随温度变化关系,选取温室内理想二氧化碳质量比为 6×10^{-4} 。

温室作物生长区分布如图 8 所示,在作物区等距离间隔 6 m 设置 1 条观测线,L1 距离湿帘入口 5 m,高度为 1 m,共设置 6 条观测线用于记录温室环境参数,Fluent 每次仿真后写出该线的平均温度、平均二氧化碳浓度,与温室内对应环境参数的理想值进行对比,实现对温室综合性能的评估。

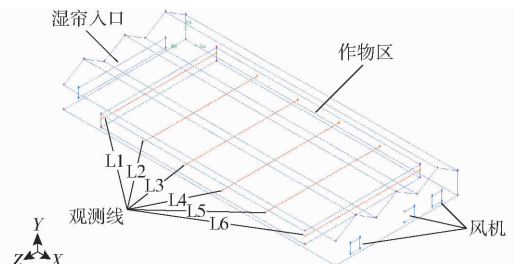


图 8 温室作物生长区分布图

Fig. 8 Distribution of crop growing areas in greenhouse

温室环境参数因子优化选取温室温度适宜性、二氧化碳分布均匀性和风机能耗为优化目标,本次

研究中,描述室内温度环境因子的适宜性采用均方根误差 (RMSE) 函数,温度适宜性指标 J_T 定义为

$$J_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (T_i - T_{idea})^2}{N_p}} \quad (2)$$

式中 T_i ——观测线 i 的线平均温度
 T_{idea} ——作物生长区域的理想温度,取 30℃
 N_p ——观测线数量

二氧化碳浓度分布均匀性指标 J_{CO_2} 为

$$J_{CO_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (C_i - C_{idea})^2}{N_p}} \quad (3)$$

式中 C_i ——观测线 i 的线平均二氧化碳浓度
 C_{idea} ——作物生长区域的二氧化碳理想浓度,取 6×10^{-4}

能耗指标 J_{energy} 为

$$J_{energy} = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta P \dot{V}_{air}}{1000 \eta_{fan}} \quad (4)$$

式中 η_{fan} ——风机效率,取 0.75
 ΔP ——通过风机的压力上升值,取 180 Pa
 \dot{V}_{air} ——送风的总容积流量

3.2 优化结果分析

基于超级计算机结合 NSGA-II 算法进行分析,人口数设置为 200,迭代次数为 5,温室边界条件湿帘入口处二氧化碳注入速率设置为 1.2×10^{-3} ,两个控制变量的变化范围设置为:湿帘入口温度 [295 K, 305 K],风机出口风速 [2 m/s, 7 m/s],使用 Fluent 18.0 求解。

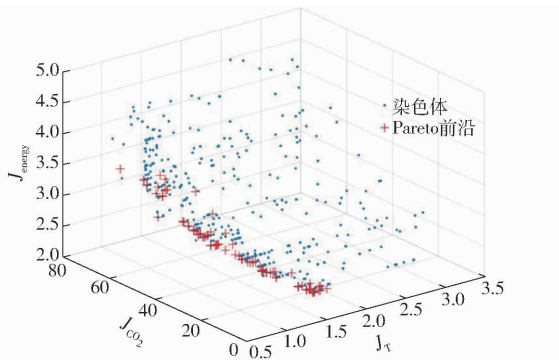


图9 NSGA-II 算法求取的 Pareto 前沿
 Fig.9 Pareto front of NSGA-II algorithm

如图9所示,最优解集收敛到 Pareto 前沿曲面。图10可以看出温度指标与温室能耗指标表现出明显的反比关系。研究得出,最佳温度适宜性指标范围在 0.61 ~ 1.95,二氧化碳浓度分布均匀性指标范围在 12 ~ 68,以及能耗指标范围在 2.7 ~ 3.9,对应的控制变量湿帘入口温度为 [296.6 K, 302 K],风机出口风速范围 [2.9 m/s, 5.5 m/s]。从 Pareto 前

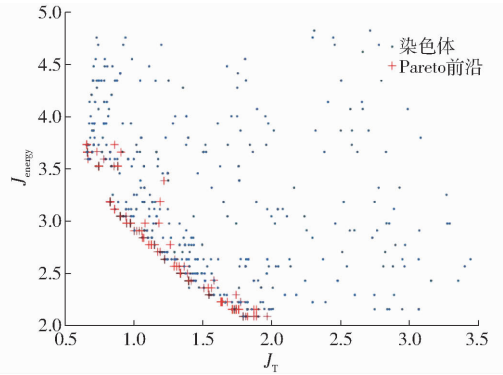


图10 NSGA-II 优化结果
 Fig.10 NSGA-II optimization results

沿的最优解中,考虑到能耗与环境参数性能的平衡,选择一组控制变量值设置温室边界条件,湿帘入口温度为 299.5 K,风机出口风速为 4.2 m/s,进行 CFD 仿真。图11分别为温室高度 1 m 与 1.7 m 处温度分布轮廓图,可以看出,温室内作物主要生长区域温度在 29.5 ~ 32.85℃ 之间,适合华东地区夏季作物培育。图12分别为温室高度 1 m 与 1.7 m 处二氧化碳浓度分布轮廓图,可以看出,作物区域二氧化碳浓度分布均匀。3个指标 $J_T = 1.25, J_{CO_2} = 38.96, J_{energy} = 3.41$,使用此方案可以对温室内部温度场、二氧化碳浓度分布提供有效优化,同时控制温室能耗,适宜作物生长。

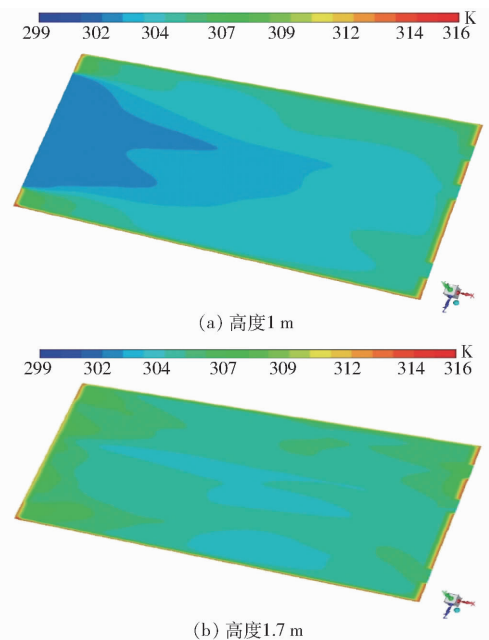


图11 气温分布轮廓
 Fig.11 Temperature distribution profiles

4 结论

(1)通过建立温室建筑 CFD 模型,温度场、二氧化碳分布模拟结果与华东地区实地实验所测结果吻合良好,平均相对误差分别为 4.9% 和 7.05%,表明

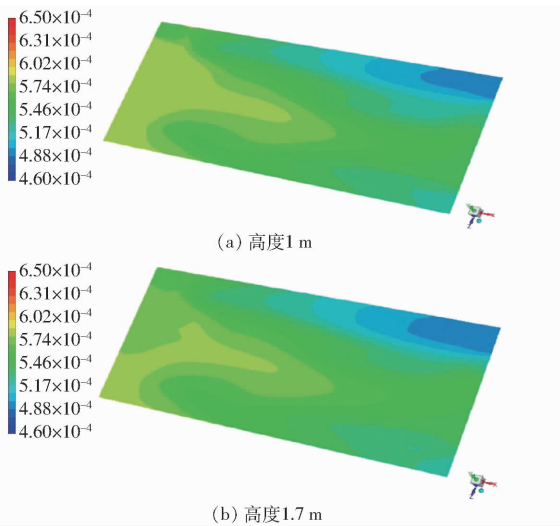


图 12 二氧化碳浓度分布轮廓

Fig. 12 Profiles of carbon dioxide distribution

建立的 CFD 模型有效,模拟玻璃温室内环境参数分布可行。

(2) 结合 NSGA-Ⅱ 算法建立 C++-Fluent 优化框架,对温室环境因子进行调节优化,可以得到温室控制量的有效参数范围,温室湿帘入口温度选取区间为 $[296.6\text{ K}, 302\text{ K}]$,风机出口风速范围设置区间为 $[2.9\text{ m/s}, 5.5\text{ m/s}]$,选取一组控制变量值设置温室边界条件进行仿真模拟,通过结果分布可以看出,对于控制调节有参考价值。

(3) 基于超级计算机结合多目标优化算法对温室内部温度场、速度场和二氧化碳浓度分布进行优化研究,寻求温室耗能与环境适宜性相平衡,相比个人计算机计算效率大幅提高,计算时长缩短约 88.09%。

参 考 文 献

- [1] 马万征,马万敏. 智能温室环境控制的研究现状及发展趋势[J]. 北方园艺, 2011(23): 179-180.
MA Wanzheng, MA Wanmin. Research status and development trend of intelligent greenhouse environmental control [J]. Northern Horticulture, 2011(23): 179-180. (in Chinese)
- [2] 丁为民,汪小岳,李毅念,等. 温室环境控制与温室模拟模型研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 162-168.
DING Weimin, WANG Xiaochan, LI Yinian, et al. Review on environmental control and simulation models for greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 162-168. (in Chinese)
- [3] 杨学坤,蒋晓,诸刚. 温室环境控制技术的研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(4): 16-18.
YANG Xuekun, JIANG Xiao, ZHU Gang. Research status and development trend of greenhouse environmental control technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 16-18. (in Chinese)
- [4] OKUSHIMA L, SASE S, NARA M. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics [J]. Acta Horticulturae, 1989, 248: 129-136.
- [5] VILLAGRAN E A, ROMERO E J B, BOJACA C R. Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate [J]. Biosystems Engineering, 2019, 188: 288-304.
- [6] BOULARD T, WANG S. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 34: 173-190.
- [7] 程秀花,毛罕平,倪军. 基于 CFD 的自然通风玻璃温室湿热环境模拟与测试[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2010, 31(3): 90-94.
CHENG Xiuhua, MAO Hanping, NI Jun. Simulation and test of humid and hot environment in natural ventilation glass greenhouse based on CFD [J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Sciences Edition), 2010, 31(3): 90-94. (in Chinese)
- [8] 李永欣,李保明,李真,等. Venlo 型温室夏季自然通风降温的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6): 44-48.
LI Yongxin, LI Baoming, LI Zhen, et al. CFD numerical simulation of natural ventilation cooling in Venlo greenhouse in summer [J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(6): 44-48. (in Chinese)
- [9] SIGRIMIS N, ANASTASIOU A, RERRAS N. Energy saving in greenhouses using temperature integration: a simulation survey [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(3): 321-341.
- [10] BARTZANAS T, BOULARD T, KITTAS C. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 479-490.
- [11] 周伟,汪小岳,李永博. 可变边界条件下的 Venlo 温室温度场三维非稳态模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 304-310.
ZHOU Wei, WANG Xiaochan, LI Yongbo. Unsteady temperature simulation under variable boundary conditions for Venlo type greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 304-310. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141147&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.047. (in Chinese)
- [12] 邓璐娟,冯巧玲,李淑君,等. 智能温室环境控制的研究现状与发展方向[J]. 郑州轻工业学院学报, 2003, 18(4): 20-23.
DENG Lujuan, FENG Qiaoling, LI Shujun, et al. Research status and development direction of environmental control of intelligent greenhouse [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry, 2003, 18(4): 20-23. (in Chinese)

- [13] 张雪花, 张武, 李叶云, 等. 基于灰色粒子群算法的温室环境多目标优化控制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(2): 217-221.
ZHANG Xuehua, ZHANG Wu, LI Yeyun, et al. Multi objective optimal control of greenhouse environment based on grey particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 43(2): 217-221. (in Chinese)
- [14] LIU Wei, CHEN Qingyan. Optimal air distribution design in enclosed spaces using an adjoint method[J]. Inverse Problems in Science & Engineering, 2015, 23(5): 760-779.
- [15] 孙耀杰, 蔡昱, 张馨, 等. 基于WDNN的温室多特征数据融合方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 273-280.
SUN Yaojie, CAI Yu, ZHANG Xin, et al. Multi-feature data fusion method of greenhouse based on WDNN [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 273-280. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190231&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.031. (in Chinese)
- [16] 胡瑾, 田紫薇, 汪健康, 等. 基于离散曲率的温室CO₂优化调控模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 337-346.
HU Jin, TIAN Ziwei, WANG Jiankang, et al. Carbon dioxide optimal control model based on discrete curvature [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 337-346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190939&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.039. (in Chinese)
- [17] LAMMARI K, BOUNAAMA F, DRAOUI B, et al. GA optimization of the coupled climate model of an order two of a greenhouse[J]. Energy Procedia, 2012, 18(18): 416-425.
- [18] 张军华, 沈楷程, 陈丹艳, 等. 基于物联网的日光温室冠层特征温度时空变化规律分析[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 335-342.
ZHANG Junhua, SHEN Kaicheng, CHEN Danyan, et al. Spatio-temporal variation of canopy characteristic temperature in solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 335-342. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210736&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.036. (in Chinese)
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] 徐立鸿, 苏远平, 梁毓明. 面向控制的温室系统小气候环境模型要求与现状[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 1-15.
XU Lihong, SU Yuanping, LIANG Yuming. Requirement and current situation of control-oriented microclimate environmental model in greenhouse system[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 1-15. (in Chinese)
- [21] 胥芳, 蔡彦文, 陈教料, 等. 湿帘-风机降温下的温室热/流场模拟及降温系统参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 201-208.
XU Fang, CAI Yanwen, CHEN Jiaoliao, et al. Temperature/flow field simulation and parameter optimal design for greenhouses with fan-pad evaporative cooling system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 201-208. (in Chinese)
- [22] 李永博, 孙国祥, 楼恩平, 等. 基于CFD模型的温室温度多指标GA优化控制[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 186-191.
LI Yongbo, SUN Guoxiang, LOU Enping, et al. Multi index GA optimal control of greenhouse temperature based on CFD model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 186-191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130334&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.034. (in Chinese)
- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [24] KORNER O. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation [D]. Wageningen: Wageningen University, 2003.