

南方连栋塑料温室夏季机械通风优化设计

黄震宇¹ 高浩天¹ 朱森林¹ 赵春宇¹ 蔡春花²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海浦东现代农业温室工程技术有限公司, 上海 201210)

摘要: 我国南方地区夏季长期高温, 严重影响了温室作物生长。为了提高降温效果且减少通风能耗, 需要优化温室机械通风系统的设计参数和控制方法。以南方地区典型的连栋塑料温室为研究对象, 针对温室机械通风, 建立了三维全尺度瞬态及稳态计算流体力学仿真模型。通过在温室内、外均匀布置温、湿度和光照传感器, 测量机械通风引起的温室内气温变化和分布, 用实验验证了仿真模型瞬态和稳态计算的准确性和有效性。通过仿真模型模拟了室外高温条件下的风机数量、温室长度、入口温度及环境温度变化等参数对机械通风降温效果的影响程度, 并模拟了不同数量风机启闭控制的降温效果。本文提供的控制策略最高可减少约 60% 的能源消耗, 而植物冠层平均温度仅升高 0.21℃。

关键词: 连栋塑料温室; 机械通风; 优化设计; 计算流体力学

中图分类号: S625.5+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0252-08

Optimization Design of Mechanical Ventilation for Multi-span Plastic Greenhouses in Southern China during Summer

HUANG Zhenyu¹ GAO Haotian¹ ZHU Senlin¹ ZHAO Chunyu¹ CAI Chunhua²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Shanghai Pudong Modern Agriculture Greenhouse Engineering Technology Company, Shanghai 201210, China)

Abstract: Due to the long-term summer in southern China, the crops in greenhouses suffer from high temperature seriously. In order to improve the cooling effect and reduce the energy consumption of ventilation, it is necessary to optimize the design and control strategy for the mechanical ventilation system of greenhouses. A full-scale 3-D transient and steady CFD simulation model was established for a typical multi-span plastic greenhouse in southern China. By using evenly distributed temperature, humidity and light sensors inside and outside the greenhouse, the variation and distribution of temperature driven by the mechanical ventilation were measured. The comparison between the experimental and simulation results showed that the CFD model was valid. Under the high ambient temperature, the CFD model was carried out to investigate the impact of design parameters, such as the number of working fans, length of greenhouse, inlet temperature and outside environment temperature, on cooling effect of mechanical ventilation. And then the cooling effect under different control strategies of mechanical ventilation was simulated to reduce the energy consumption. The proposed CFD model can provide optimized parameters for the design and control of multi-span plastic greenhouse mechanical ventilation in summer, which can be applied to improve the cooling effect and reduce energy consumption of ventilation.

Key words: multi-span plastic greenhouse; mechanical ventilation; optimization design; computational fluid dynamics

引言

在我国南方地区的夏季, 长期高温导致温室内

的气温过高, 严重影响了作物生长。为此, 南方地区广泛使用的连栋塑料温室普遍配备了降温设施: 遮阳网、用于自然通风的顶窗和侧窗、用于机械通风的

湿帘-风机等。在夏季晴好天气,使用遮阳网减少进入温室的太阳辐射量,从而降低室内的升温速度。在气温较低的夏季清晨和傍晚,采用顶窗和侧窗的自然通风降低室内气温,具有无运行能耗、设备成本低的优点,但降温效果很大程度上受室外气温、风速、风向和窗口配置的影响^[1-2],且原则上能达到的最低室内气温略高于室外气温。在夏季正午,由于室外气温明显高于作物的适宜生长温度,需要通过打开风机和湿帘,将经过湿帘形成的冷风抽入温室,实现机械通风降温^[3-4]。虽然机械通风能实现高温条件下的有效降温,但设备成本较高,工作能耗较大,有必要在温室设计阶段优化配置机械通风设备、在温室运行阶段实施有效降低能耗的优化控制方法。

机械通风过程涉及温室内空气流场、温度场、湿度场、太阳辐射等因素的相互作用,属于多物理场耦合的复杂流体动力学问题。OKUSHIMA 等^[5]首次应用计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)研究温室的通风问题,开拓了定量分析温室通风问题的有效途径。此后,随着 CFD 理论的完善和商用 CFD 软件的发展,温室通风 CFD 仿真结果已被证明具有良好的吻合性,成为温室通风研究的常用方法^[6]。在基于 CFD 的机械通风研究领域,随着仿真技术的发展和问题分析的深入,模型由二维到三维全尺度,由稳态分析到瞬态分析,由简单模拟到用于优化控制设计。BOURNETA 等^[7]采用 CFD 方法研究了不同风机形状及安装方式下的温室内流场分布情况。童莉等^[8]建立了机械通风条件下的连栋塑料温室三维 CFD 模型,结合试验与仿真结果研究了温室气温可控距离与入口风速和湿帘高度的关系。CHEN 等^[9]采用 CFD 方法研究了湿帘、风机安装位置与湿帘-风机系统降温效果之间的关系。胥芳等^[10]基于 CFD 模型对不同温室长度、湿帘面积和风机速度参数条件下的室内降温进行了优化设计。任守纲等^[11]基于 CFD 方法建立了夏季温室气温变化瞬态模型,研究了自然通风和机械通风降温措施切换控制策略。

随着连栋塑料温室调控方式逐步从电气化向自动化发展,基于温室环境参数实时控制风机的工作数量和工作时间成为可能,从而更有效地降低机械通风能耗。为实施机械通风优化控制,需要获取夏季高温条件下的机械通风效果与各工作参数的定量关系。由于实际工作环境的不可重复性,CFD 模拟比实验能更有效地确定机械通风效果与控制参数之间的关系。机械通风是典型动态过程,但目前对于机械通风瞬态过程的实验和仿真研究还不够深入,

因此本文建立全尺度三维瞬态和稳态 CFD 模型,反映机械通风作用下,室内温度的时空分布和变化过程,用以评价通风效果、优化风机的控制。

1 温室环境 CFD 建模

1.1 理论基础

由于温室内植物生产区域的气流速度不宜过高,一般低于 2 m/s,在仿真中可以假设气体为连续、稳定的牛顿流体,并忽略黏性发热和压力功。而且一般可假设气体的各组分之间无化学反应。根据温室内的气体特征,建立质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程及组分守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu_{eff} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \mathbf{F} \tag{2}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) + \nabla \cdot (\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = Q \tag{3}$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = \nabla \cdot (D_i \nabla c_i) + R_i \tag{4}$$

- 式中 ρ ——气体密度, kg/m³
 $\mathbf{u}$ ——速度矢量, m/s
 t ——时间, s
 $\mathbf{I}$ ——单位矩阵
 p ——压强, Pa
 μ_{eff} ——有效黏度, Pa·s
 $\mathbf{F}$ ——体积力矢量, N/m³
 C_p ——恒压比热容, J/(kg·K)
 T ——绝对温度, K
 $\mathbf{q}$ ——热通量矢量, W/m²
 $\mathbf{q}_r$ ——辐射热通量矢量, W/m²
 Q ——热源, W/m³
 c_i ——组分 i 的浓度, mol/m³
 D_i ——组分 i 的扩散系数, m²/s
 R_i ——系统内单位时间单位体积通过化学反应生成的组分 i 的量, mol/(m³·s)

式(1)~(4)构成了温室仿真的基本控制方程。在温室内,由于温度不均匀和机械通风的共同作用,以及流体运动受温室边界的限制,不可避免地会产生湍流。因此温室内的气体流动可看作是湍流流动^[12]。为了提高温室湍流计算效率,通常引入标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行通风仿真^[6,11,13]。同时考虑到温室靠近壁面区域湍流未充分发展,故采用标准壁面函数法处理^[12]。

1.2 温室对象

研究对象为典型的南方连栋塑料温室,位于上

海市崇明岛(东经 121.74°、北纬 31.50°),见图 1。温室顶高 5 m,肩高 3 m,屋脊方向为东西走向,长度 32 m,单栋跨度 8 m,共 5 栋,总宽度 40 m。温室西墙安装湿帘,湿帘高度为 1.8 m,中心位置安装高度为 1.3 m,每套长度为 17 m,温室南北两侧各一套,中间为 2 m 宽的推拉门。温室东墙安装 10 台 YS1250 型重锤式负压风机,每栋 2 台,风机直径为 1 250 mm,中心位置安装高度为 1.5 m,电动机功率为 1.1 kW,单台排风量 Q_{fan} 为 40 000 m³/h。温室主体采用结构钢,四周及顶部覆盖聚乙烯薄膜,薄膜厚度为 0.15 mm,透光率大于(等于)90%,顶部安装遮阳网,采用缀铝外遮阳网布,遮阳率 80%。



图 1 南方连栋塑料温室

Fig. 1 Multi-span plastic greenhouse in southern China

1.3 几何模型

在 COMSOL 中按 1:1 建立温室几何模型,见图 2。由于侧窗、顶窗和门在机械通风过程中均为关闭状态,该几何模型忽略了它们的细节建模。温室内的支撑结构相较温室尺寸较小,在建模过程中忽略。温室外遮阳网通过太阳辐射强度折减体现,不体现在几何模型中。实验期间温室内种植高度低于 20 cm 的西瓜和甜瓜,可以忽略作物几何建模^[11,14]。

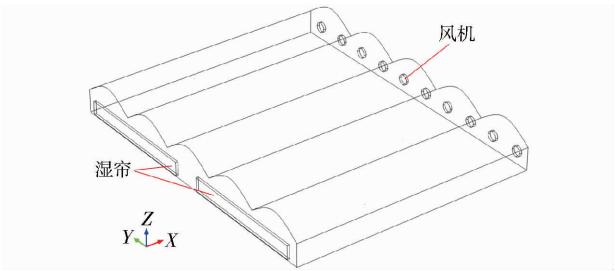


图 2 温室几何模型

Fig. 2 Geometrical model of greenhouse

1.4 多物理场

机械通风条件下,室内气温的时空分布受室内外环境条件、湿帘风机、太阳辐射等因素的影响。需要在 COMSOL 中添加湍流模块、流体传热模块和稀物质传递模块。然后建立各物理场模块间的耦合关系:湍流模块和稀物质传递模块通过速度、绝对压力和浓度耦合;湍流模块和流体传热模块通过速度、绝对压力和温度耦合;稀物质传递模块和流体传热模块通过浓度耦合。为了引入流体传热模块对流体密度和黏度的影响,添加非等温流模块。

1.5 边界条件

为获得机械通风的初始状态,研究机械通风过

程及升温过程,仿真分为湿帘风机关闭状态和开启状态。前者温室处于密闭环境,风机和湿帘处于关闭状态,用以计算自然对流状态下温室内的状态;后者风机和湿帘处于开启状态,进行机械通风仿真,用以计算湿帘风机对温室内环境的影响。

仿真以温室内空气为研究对象,所涉及的边界条件包括室外环境参数、温室围护结构和顶棚、风机与湿帘、室内土壤等,边界条件设置见表 1。由于关注的仿真过程较短,故可以忽略在此期间各边界条件参数的变化,各算例基本参数设置见表 2。

表 1 CFD 模型边界条件

Tab. 1 Boundary condition used in CFD model				
类型	边界	湍流场	流体传热	稀物质传递
关闭风机	四周围护	壁面	热通量、散射面	无通量
	顶棚	壁面	热通量、散射面	无通量
	地面	壁面	温度、散射面	无通量
	风机	壁面	热通量、散射面	无通量
	湿帘	壁面	热通量、散射面	无通量
开启风机	四周围护	壁面	热通量、散射面	无通量
	顶棚	壁面	热通量、散射面	无通量
	地面	壁面	温度、散射面	无通量
	风机	压力出口	流出	流出
	湿帘	速度入口	温度	浓度

表 2 基本参数设置

Tab. 2 Common parameters used in CFD model	
参数	数值
太阳辐射强度/(W·m ⁻²)	832
室外环境温度/℃	36.5
室内地面温度/℃	39.5
入口相对湿度/%	82.3
薄膜壁面温度/℃	39.5
薄膜顶棚温度/℃	41.5
薄膜对流换热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	6.6
土壤发射率	0.92
薄膜发射率	0.70
土壤吸收率	0.88
薄膜吸收率	0.10

湿帘风机关闭状态下,对温室设置体积力域,用以计算温度影响空气密度带来的自然对流,并设置压力约束点以提供压力参考点。

湿帘风机开启状态,入口风速计算式^[11]为

$$v_{in} = nQ_{fan}/S_{in} \tag{5}$$

式中 v_{in} ——入口风速, m/s
 n ——开启风机数量, 台
 Q_{fan} ——单台风机排风量, m³/h
 S_{in} ——入口面积, m²

入口温度可根据湿帘降温模型^[15]计算,即

$$T_{in} = T_{out} - E(T_{out} - T_w) \tag{6}$$

式中 T_{in} ——湿帘后干球温度,℃
 T_{out} ——湿帘前干球温度,℃
 E ——湿帘蒸发冷却换热效率
 T_w ——湿帘前湿球温度,℃

1.6 网格划分和求解步骤

选取整栋温室作为计算域。温室内部采用自由剖分四面体网格进行划分,并在湿帘入口、风机出口和壁面边界进行边界层加密,以适应该区域速度、温度和浓度梯度变化大的要求。为得到数值计算的网格无关解,反复尝试不同密度的网格,本次计算整个模型共划分 743 604 域单元、59 854 边界单元和 2 424 边单元。

第1阶段进行湿帘风机关闭状态稳态求解;第2阶段进行湿帘风机开启状态瞬态求解,求解变量的初始值设为第1阶段的计算解;随后以上阶段结果为初始值进行稳态或瞬态任意状态仿真。各阶段间的计算主要关注速度、压力、温度、浓度等参数的传递。

所有计算在 Intel Xeon E5-1620V3 CPU,主频 3.5 GHz,内存 64 GB,操作系统为 64 位 Windows 10 的计算机上进行,建模过程中前处理、求解、后处理等过程均在 COMSOL Multiphysics 5.2 环境下进行。各算例稳态计算历时近 6 h,瞬态计算与仿真步长、时长有关,如步长 1.5 s、时长 10 min 历时近 15 h。

2 机械通风实验

2.1 实验平台

实验采用上海交通大学智能机电系统控制研究所研制的基于物联网的智能温室环境参数监测系统“iGreenhouse Monitor”。该系统基于 ZigBee 的无线传感器网络,最多可达 50 个节点,室内节点如图 3 所示,可监测温室内空气温湿度、土壤温湿度、光照强度,室外空气温湿度、风速、风向、大气压、雨量及太阳辐射强度。土壤表面温度测量采用 CA380 型手持式红外测温仪,薄膜温度测量采用 PT100 型铂电阻。传感器详细参数见表 3。

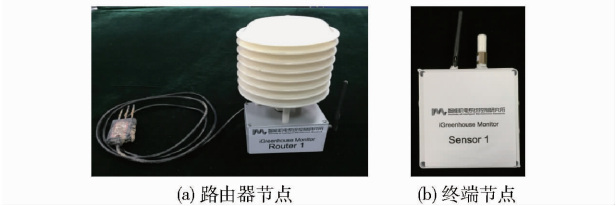


图3 无线传感网络路由器和终端节点

2.2 实验方案

7月下旬—8月上旬,上海地区的气温达到全年的峰值,该段时间的温室降温尤为重要。实验时间

表3 传感器参数
Tab.3 Parameters of sensors

传感器类型	测量范围	测量精度
室内空气温度	-40 ~ 123.8℃	±0.3℃
室内空气相对湿度	0 ~ 100%	<2%
室内土壤温度	-40 ~ 80℃	±0.5℃
室内土壤相对湿度	0 ~ 100%	<5%
室外空气温度	-40 ~ 123.8℃	±0.2℃
室外空气相对湿度	0 ~ 100%	<3%
室外风速	0 ~ 60 m/s	±3%
室外风向	0 ~ 359.9°	±3°
室外大气压	10 ~ 1 100 hPa	±0.5 hPa
室外太阳辐射强度	0 ~ 2 000 W/m ²	<3%
土壤表面温度	-32 ~ 380℃	±2℃
薄膜温度	-200 ~ 200℃	±0.15℃

为 2016 年 7 月 31 日,天气晴朗,室外温度较高且相对平稳。开始时间为 13:10,温度为 1 d 中最高阶段,室外气温达到 36℃ 以上。由于室内气温达到 32℃ 以上将不适宜作物生长,此时需开启湿帘-风机进行机械通风降温。实验期间遮阳网为打开状态。

温室内传感器每 20 s 记录一次数据。温室内外共布置 30 个测量节点,如图 4 所示。传感器编号方式如下:距离湿帘 4、12、24 m 位置编号 A、B、C,距离地面 1.3 m 和 2 m 位置编号 L、H,自北向南每栋编号 1、2、3、4、5,除 HA1、HC1、HA5、HC5 外,其余位置各布置一个节点;另外分别在紧邻湿帘内外正中间位置东西各布置一个节点。室外气象站布置在距离温室 10 m 处的空旷区域。

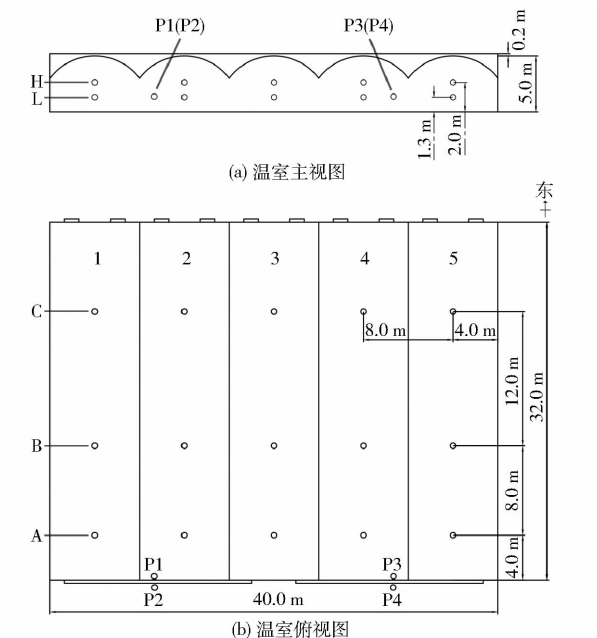


图4 温室内传感器节点分布图

实验步骤:
(1)关闭所有门窗,待室内气温升高至稳定。
(2)打开风机,待室内气温降低至稳定。

- (3)关闭风机,待室内气温升高至稳定。
- (4)重复上述步骤,进行下一组实验。

2.3 实验结果

本次实验分别进行了启闭 10 台、6 台和 4 台风机的实验。最具代表性的先后启闭 10 台和 4 台风机情况下植物冠层即截面 L 典型位置测得的气温变化曲线如图 5 所示。

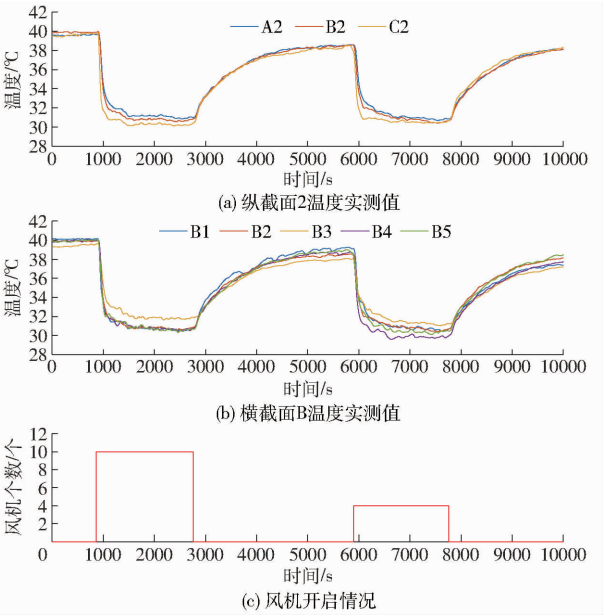


图 5 温室内植物冠层温度实测值变化曲线
Fig. 5 Measured temperatures of plant canopy inside greenhouse at section L

由实验结果可以看出,开启 10 台和 4 台风机,各测点气温变化趋势一致,即开启风机时快速下降,随后缓慢下降,最后达到并保持稳定。开启 10 台风机的情况下,相较于开启 4 台风机,气温下降速度较快,且纵向温度梯度较大,稳定温度略低,横向分布

较为均匀,两者温度上升趋势基本一致。
图 5a 为屋脊方向典型纵截面的实验结果,可以观察到与湿帘不同距离测点气温的变化情况,可以看出距离湿帘越近,气温下降越早,且达到的稳定温度越低。图 5b 为跨度方向典型横截面的实验结果,可以观察到每栋测点气温的变化情况,可以看出受推拉门处造成湿帘不连续的影响,第 3 栋降温效果最差,气温下降速度最慢,稳定温度最高。

3 模型验证与通风过程分析

3.1 模型验证

模型验证时选取实验参数作为边界条件参数,具体参数见表 4 方案 1 及表 2。实验条件下,温室内植物冠层典型截面(即纵截面 2 和横截面 B),各测点气温仿真值和实测值如图 6 所示,由于横截面 B 具有对称性,在此仅展示 B1、B2、B3 测点结果。

表 4 仿真方案参数设置

Tab. 4 Parameters in different simulation cases				
方案编号	风机数量/个	入口温度/℃	温室长度/m	环境温度变化量/℃
1	10	30	32	0
2	6	30	32	0
3	4	30	32	0
4	2	30	32	0
5	10	28	32	0
6	10	29	32	0
7	10	31	32	0
8	10	30	40	0
9	10	30	48	0
10	10	30	100	0
11	10	30	32	1
12	10	30	32	-1

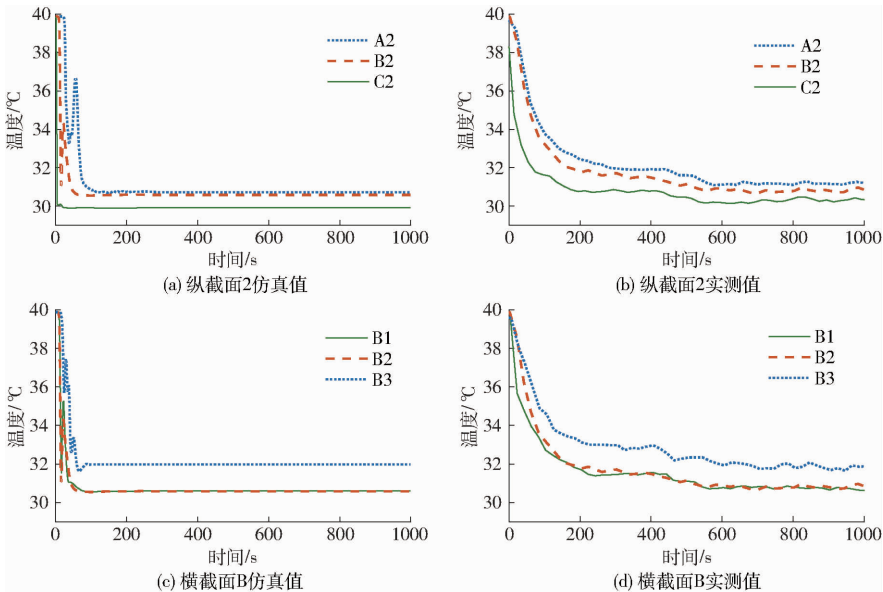


图 6 植物冠层仿真温度与实测温度变化曲线
Fig. 6 Changing curves of simulated and measured temperatures at section L

由图 6 可知,在气温下降阶段,各测点的仿真值相比于对应实测值下降速率明显快,其主要原因是仿真模型是理想的密封环境,而实际温室存在不可避免的空气渗透问题。在稳定阶段两者基本一致。变化过程中温度梯度也保持一致,即纵截面 2 方向距离湿帘越近气温下降越快,温度也较低,第 1 栋与第 2 栋气温基本一致,第 3 栋气温相对较高,且下降速度较慢。

从风机开启至气温下降到稳定阶段,温室内所有测点的绝对误差,即实测值与仿真值之差,分布如图 7 所示。由图可知,误差较大的区域主要集中在气温快速下降阶段,其主要原因是温室的空气渗透问题,导致实际情况下气温下降速率相较于仿真略缓慢,由图 6 也可观察到这一现象,从而导致在气温快速下降阶段误差较大。整个过程均方根误差为 1.39℃,平均相对误差为 2.63%,稳定阶段均方根误差为 0.53℃,平均相对误差为 0.79%。误差分析结果表明,仿真值与实测值虽存在一定偏差,但整体温度场的分布和温度变化的趋势基本一致,所建立的模型是有效的,仿真结果能够比较准确地显示温室气温的分布和变化。

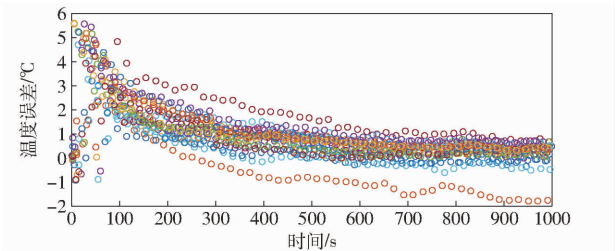


图 7 仿真值与实测值绝对误差分布

Fig. 7 Distribution of absolute error between simulated and measured temperatures

3.2 机械通风过程分析

图 8 和图 9 为方案 1 条件下机械通风过程中纵截面 2 和横截面 L 的速度瞬态分布云图。从图中可以看出,受机械通风、热浮力共同作用,以及温室边界的限制,温室内气体流动存在湍流现象。湿帘入口和风机出口处速度较高,且变化较为剧烈,呈现明显的速度梯度,从出入口向温室内部风速逐渐减弱。由图 9 可以看出,受到温室推拉门的影响,温室中部风速明显较低,且基本不发生变化,通风效果较差。

图 10 和图 11 为方案 1 条件下机械通风过程中纵截面 2 和横截面 L 的温度瞬态分布云图。从图中可以看出:整个通风过程中,四周壁面和地面附近温度相对较高,主要因为这些地方受到强烈太阳辐射的影响;顶棚附近温度较高,主要因为受太阳辐射和热浮力共同影响。

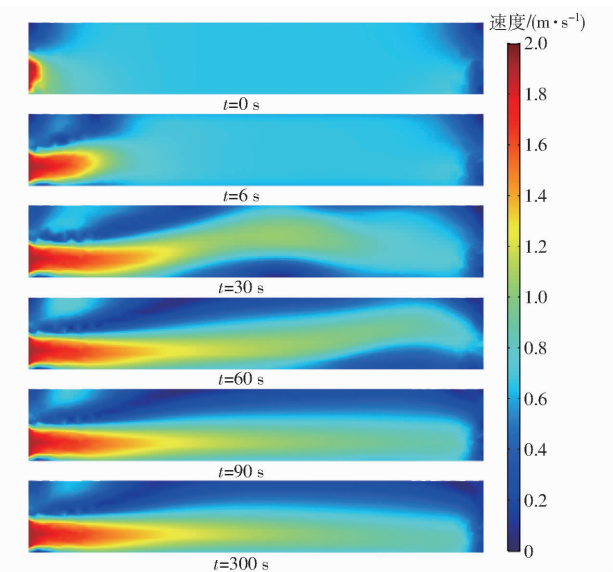


图 8 纵截面 2 速度瞬态分布云图

Fig. 8 Transient distribution contours of velocity at section 2

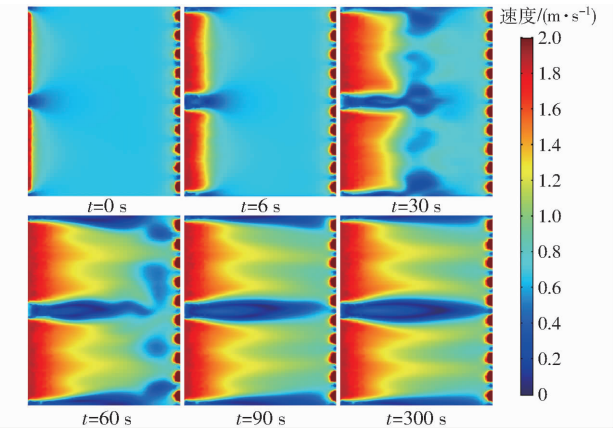


图 9 横截面 L 速度瞬态分布云图

Fig. 9 Transient distribution contours of velocity at section L

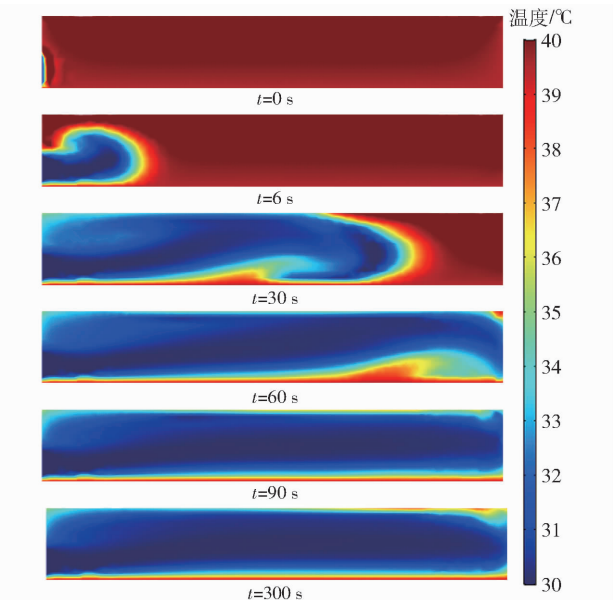


图 10 纵截面 2 温度瞬态分布云图

Fig. 10 Transient distribution contours of temperature at section 2

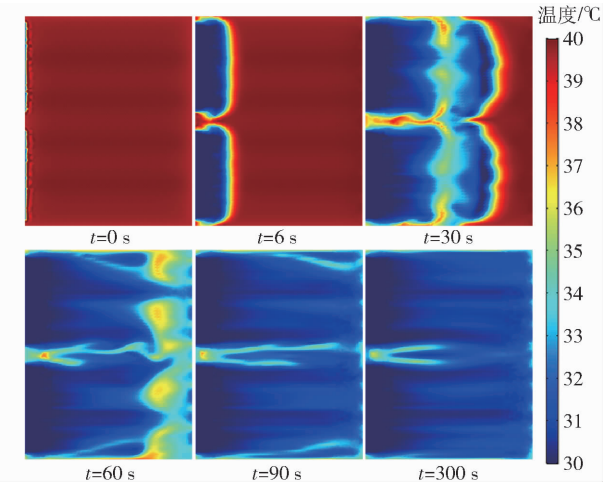
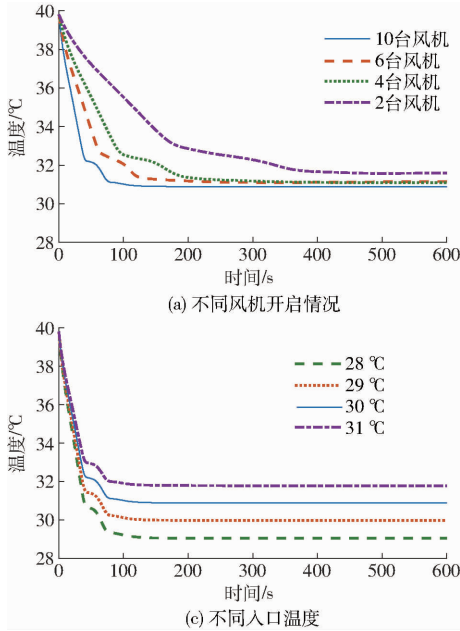


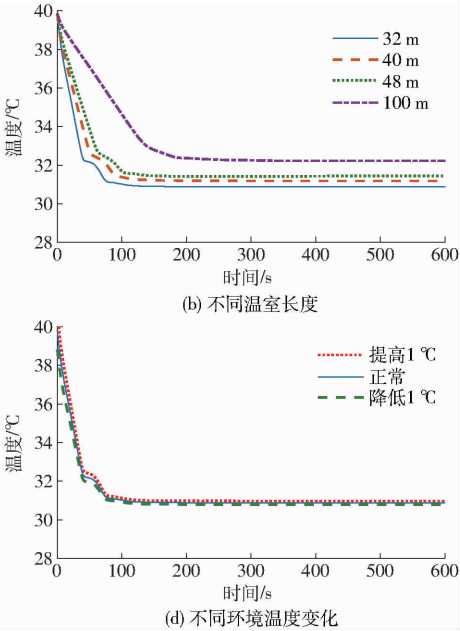
图 11 横截面 L 温度瞬态分布云图

Fig. 11 Transient distribution contours of temperature at section L

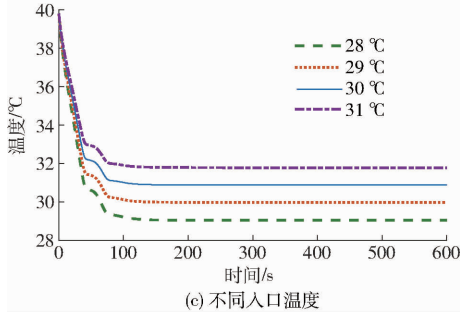
机械通风形成的冷空气在向前推进的过程中,冷空气会包裹暖空气形成温度漩涡,未及时推动的



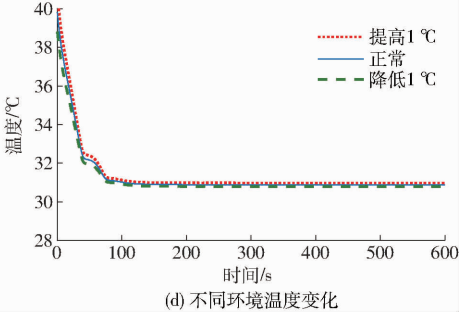
(a) 不同风机开启情况



(b) 不同温室长度



(c) 不同入口温度



(d) 不同环境温度变化

图 12 横截面 L 不同方案下空气温度仿真平均值变化曲线

Fig. 12 Changing curves of simulated average air temperature in different cases at section L

由图 12a 可以看出随着开启风机数量减少,温室内降温速度在一定程度上变慢,且稳定温度会升高。相较于开启 10 台风机降温至稳定的时间,开启 6 台风机约为其 1.5 倍,开启 4 台风机约为其 2.2 倍,开启 2 台风机约为其 4.5 倍。相较于开启 10 台风机,开启 6 台和 4 台风机约升高 0.3℃,开启 2 台风机约升高 0.7℃。因此在降温速度要求不高的情况下,可适当减少开启风机的数量,减少能源消耗。

由图 12b 可以看出,温室长度的增加会影响降温效果,增加降温时间,提高稳定温度,但在一定范围内对降温效果的影响较小,如增加 50% 的情况下,平均稳定温度仅升高 0.5℃,但单位面积能耗明显下降。因此可适当增加温室长度,降低温室单位

暖空气会被卷入其中,在冷空气气流中不断进行热交换并向前移动,直至到达风机口处排出。受温室边界及热浮力的影响,温室各角落温度相对较高。由于气流将热空气携带至风机口处排出,同时受到风机处边界的阻碍,导致风机口处温度相对较高。由于推拉门的存在,温室中部通风效果较差,导致该区域降温效果也较差。

4 机械通风优化设计

4.1 机械通风参数优化

为分析开启风机个数、入口温度、温室长度和环境温度变化(即相对于表 2 室内地面温度、薄膜壁面温度和薄膜顶棚温度变化)对温室机械通风降温效果的影响,共进行 12 组仿真计算,参数设置如表 4 所示,其它基本参数见表 2。

图 12 为表 4 的不同方案下,植物冠层即横截面 L 气温仿真平均值的变化曲线。

面积能耗。

由图 12c 可以看出,入口温度的降低对于降温速度的影响较小,但会显著降低稳定温度,每降低 1℃,稳定温度平均可降低 0.9℃。入口温度对于温室降温效果的影响较为显著,可通过降低入口温度的方式提高降温效果,如使用地下水、增加湿帘厚度等。

由图 12d 可以看出,较小范围地改变外界环境温度,对于机械通风的降温效果影响较小。

4.2 机械通风策略优化

图 13 所示为不同控制策略下,植物冠层气温仿真平均值的变化曲线。策略 1 为开启 10 台风机持续工作;策略 2 为开启 10 台风机降温至稳态温度后关闭风机,待温度回升到一定程度后再次开启 10 台

风机降温,为保证温室平均气温低于 32℃,本文在温度回升至 32.59℃时即再次开启风机进行降温;策略 3 为开启 10 台风机迅速降温至稳态温度后只保留 4 台风机开启维持降温效果。

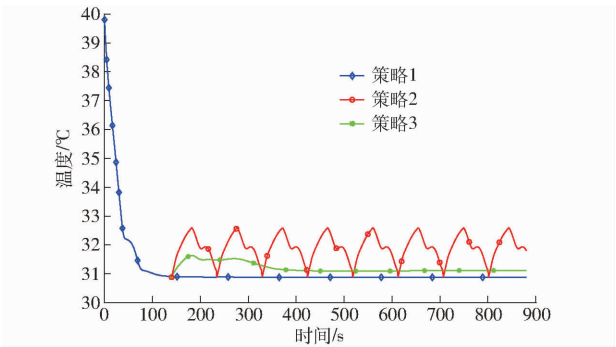


图 13 横截面 L 不同控制策略下空气温度仿真平均值变化曲线

Fig. 13 Changing curves of simulated average air temperature with different control strategies at section L

在长时间连续降温过程中,开始阶段的快速降温的能耗可忽略,因此选取 600 s 以后的 2 个完整周期评价策略效果,结果如表 5 所示。

表 5 不同控制策略结果比较

Tab. 5 Comparison of results with different control strategies			
参数	策略 1	策略 2	策略 3
风机数量/个	10	10	4
间歇比	1	0.53	1
等效风机数量/个	10	5.3	4
平均温度/℃	30.88	31.82	31.09
最高温度/℃	30.88	32.59	31.09
温度稳定性/℃	<0.1	<0.43	<0.1

注:温度稳定性为完整周期内的温度均方根误差,间歇比指风机开启时间的占比。

策略 1 降温效果和稳定性最好,但能源消耗过大,降温成本较高,策略 2 温室平均温度升高 0.94℃,稳定性也较差,但可降低约 47% 的能源消耗,策略 3 温室平均温度升高 0.21℃,稳定性也较好,同时可降低 60% 的能源消耗。因此针对实验温室,选择策略 2 和策略 3 都能大幅降低能源消耗,而策略 3 从实现的简单和效果两方面都为较适宜的机械通风控制策略。

5 结论

(1)建立了南方连栋塑料温室全尺度三维瞬态及稳态机械通风仿真模型。通过实验验证了仿真模型预测气温瞬态变化趋势和稳态分布的准确性。结果表明,气温下降阶段仿真值与实测值误差较大,原因是仿真模型的理想密封环境与实际温室存在的空气渗透之间存在差异;气温达到稳定阶段两者保持一致;且整个过程各点温度梯度保持一致。

(2)仿真结果表明:开启风机的数量对降温速度影响较大,对稳定温度影响较小;与湿帘水温等直接相关的入口温度对稳定温度影响显著,每降低 1℃,稳定温度平均可降低 0.9℃;温室长度和外界环境温度对降温效果影响较小,温室长度增加 50%,平均稳定温度仅升高 0.5℃;湿帘入口的不连续会严重影响温室部分区域的降温效果。

(3)控制策略研究表明:可合理控制风机开启时机、开启时长和风机数量,以达到节能减排,节约温室使用成本的目的。采用 10 台风机间歇运行和 10 台风机快速降温、4 台风机维持的策略,可比 10 台风机持续运行分别降低约 47% 和 60% 的能源消耗,植物冠层平均温度仅升高 0.94℃ 和 0.21℃。

参 考 文 献

1 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141147&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.047.
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. (in Chinese)

2 ROY J C, BOULARD T. CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models[J]. Acta Horticulturae, 2005, 691:457 – 464.

3 TOMAS N, SUN D, JIM G, et al. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(12): 2386 – 2414.

4 KUMAR K S, TIWARI K N, JHA M K. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: a review [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(12): 1269 – 1275.

5 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.

6 KACIRA M, SASE S, OKUSHIMA L. Optimization of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 2059 – 2067.

7 BOURNETA P E, BOULARD T. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 195 – 217.

- WU Feng, WU Pute, FAN Yongshen, et al. Distribution of soil water potential energy under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 31–35. (in Chinese)
- 28 陈丽娟, 冯超, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44–51. CHEN Lijuan, FENG Chao, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 44–51. (in Chinese)
- 29 MOHAMMAD R, EMDAD S R, RAINE R J, et al. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation[J]. Irrigation Science, 2004, 23(2): 55–60.
- 30 肖振华, 万洪富. 灌溉水质对土壤水力性质和物理性质的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(3): 359–366. XIAO Zhenhua, WAN Hongfu. Effect of irrigation water quality on soil hydraulic and physical properties[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(3): 359–366. (in Chinese)
- 31 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 231–236. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Study on impact of sodium adsorption ratio of saline water on soil physical and chemical properties and infiltration characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 231–236. (in Chinese)
- 32 HEYDARI N, DAS A, GUPTA R L. Salinity and solidity influences on infiltration during surge flow irrigation[J]. Irrigation Science, 2001, 20(4): 165–173.
- 33 ABDEL G G, ARSLAN A, GAIHBE A, et al. The effects of saline irrigation water management and salt tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria [J]. Agricultural Water Management, 2005, 78(12): 39–53.
- 34 牛文全, 薛万来. 矿化度对微润灌溉土壤入渗特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 163–172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140426&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.026. NIU Wenquan, XUE Wanlai. Effects of mineralization degrees on soil infiltration under moistube-irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 163–172. (in Chinese)
- 35 刘胜尧, 范凤翠, 李志宏, 等. 咸水负压灌灌对番茄生长和土壤盐分的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 108–117. LIU Shengyao, FAN Fengcui, LI Zhihong, et al. Effects of negative pressure irrigation with saline water on tomato yield and soil salt[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 108–117. (in Chinese)
- 36 马东豪, 王全九, 来剑斌. 膜下滴灌条件下灌水水质和流量对盐分分布影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 42–46. MA Donghao, WANG Quanjiu, LAI Jianbin. Field experimental studies on the effects of water quality and drip rate on soil salt distribution in drip irrigation under film[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 42–46. (in Chinese)

(上接第 259 页)

- 8 童莉, 张政, 陈忠购, 等. 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 33–37. TONG Li, ZHANG Zheng, CHEN Zhonggou, et al. Simulation of mechanical ventilation for huabei type multispan plastic greenhouse[J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6): 33–37. (in Chinese)
- 9 CHEN J, CAI Y, XU F, et al. Analysis and optimization of the fan-pad evaporative cooling system for greenhouse based on CFD[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(4): 1–8.
- 10 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)
- 11 任守纲, 杨薇, 王浩云, 等. 基于 CFD 的温室气温时空变化预测模型及通风调控措施[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 207–214. REN Shougang, YANG Wei, WANG Haoyun, et al. Prediction model on temporal and spatial variation of air temperature in greenhouse and ventilation control measures based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 207–214. (in Chinese)
- 12 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 13 吴飞青, 张立彬, 胥芳, 等. 机械通风条件下玻璃温室热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 153–158. WU Feiqing, ZHANG Libin, XU Fang, et al. Numerical simulation of the thermal environment in a mechanically ventilated greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 153–158. (in Chinese)
- 14 何科爽, 孙丽娟, 黄震宇, 等. 南方连栋塑料温室冬季通风除湿开窗优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 186–191. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121135&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.035. HE Keshi, SUN Lijuan, HUANG Zhenyu, et al. Optimization of vent configuration for ventilation dehumidification in multi-span plastic greenhouses[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 186–191. (in Chinese)
- 15 JB/T 10294—2013 湿帘降温装置[S]. 2013.