

可变边界条件下的 Venlo 温室温度场三维非稳态模拟*

周伟^{1,2} 汪小昆¹ 李永博¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 新疆农业大学机械交通学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 以外界温度、太阳辐射、风速风向作为随时间变化的边界条件, 基于 CFD 方法建立了 Venlo 温室自然通风三维非稳态数学模型。结果显示, 模拟值与实测值均方根误差 RMSE 为 0.688℃, 最大相对误差为 8.9%, 平均相对误差为 2.8%, 所建立 CFD 模型可以准确地描述室内温度场的时空变化。从整个模拟周期上看, 温室内温度和室外温度变化趋势一致, 室内温度和室外温度平均温差 3.09℃; 当室外风速从 0.81 m/s 跃变至 1.2 m/s, 风向由西南偏南变为西时, 温室西侧迎风口局部气流速度出现了先增大后减小的变化模式, 温室东侧上部气流速度明显增加, 除温室迎风口附近区域外大部分作物区域气流速度维持在 0~0.1 m/s 的范围内, 温室通风入口处 $x=1.5\text{ m}$ 截面和作物冠层 $y=1.4\text{ m}$ 截面平均温度在 180 s 内分别下降了 1.87℃ 和 0.92℃, 室外风速风向对温室自然通风降温效果影响显著。

关键词: Venlo 型温室 温度场 三维非稳态 CFD

中图分类号: S625; V211.1⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0304-07

引言

为了提高温室小气候环境的管控水平, 保证温室内植物生长所需的最佳环境, 建立温室环境参数动态模型是十分必要的^[1]。温室环境系统对外界环境变化的响应, 通常有不同的时间尺度, 随着日起日落、季节变化、植物生长等因素影响, 室内环境因子随室外气候变化的周期通常是天或旬; 当环境系统遇到强烈的扰动, 如风速的突变、太阳从云层后出现, 温室环境因子的响应时间通常几秒钟就能检测到^[2], 因而建立一个能在不同时间尺度下预测温室内环境参数的变化规律及动态响应特性的预测模型, 对于提高温室环境控制的效率和平稳性具有重要意义。

CFD 技术作为研究温室动力学的有力工具, 在预测温室小气候环境上得到广泛应用。对于温室小气候 CFD 建模方法, 目前大多数研究者针对不同结构的温室, 把外界气候参数作为固定边界条件, 通过稳态计算分析某一时刻某种调控机构作用下的温室内小气候的分布特性^[3-6]。而室外空气温度、风速风向、太阳辐照度等气象条件是随时间不断变化的, 因此温室内环境因子也应该是随时间和空间变化的动态过程, 稳态模型不能体现温室小气候系统的动

态特性。现阶段也有少数研究者采用非稳态计算方法分析温室内质热交换的动态特性, 佟国红等^[7-8]假设日光温室无限长并取中间横剖面进行 2D 非稳态模拟, 研究晴天室内温度随外界气候条件的变化以及墙体材料对日光温室蓄热保温性能的影响, 模型未考虑室外风速风向的连续变化和作物对环境的影响。虽然 2D 模拟和 3D 模拟相比减少了模拟过程的复杂性和大大减少了计算量, 但只能对温室内某一剖面进行局部分析且适用于温室长度远大于跨度和高度的温室结构, 因而不具有广泛适用性。对于现代商业化温室来说, 全局环境参数模拟仅采用上述的 2D 模拟达不到需要的准确性要求。何科爽^[9]等以开启天窗时刻的室内外气候参数作为固定边界条件, 以时间为变量, 对连栋塑料温室通风除湿的动态过程进行非稳态模拟, 确定最优的开窗通风组合和相应的通风时间。把室外温度、太阳辐射和风速风向作为随时间变化的边界条件, 求解连续时间域内温室温度随室外气候条件变化的 3D 非稳态过程, 在 Venlo 型玻璃温室的应用中还未见报道。

本文以温室内温度场为研究对象, 以外界温度、太阳辐射、风速风向作为随时间变化的边界条件, 建立 Venlo 温室 3D 非稳态 CFD 模型, 探索不同时间尺度下温室温度动态特性的模拟预测方法。

收稿日期: 2014-01-09 修回日期: 2014-02-26

* 国家自然科学基金资助项目(61273227)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011336)和江苏省前瞻性研究资助项目(SBY201220290)

作者简介: 周伟, 博士生, 新疆农业大学讲师, 主要从事设施农业模拟与控制研究, E-mail: zhouweixj@126.com

通讯作者: 汪小昆, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物环境模拟与调控研究, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

1 温室环境 CFD 建模

1.1 试验温室物理模型

试验温室位于东经 118°46′, 北纬 32°03′, 为双脊 Venlo 型铝合金玻璃温室, 屋脊为东西走向。肩高 4.2 m, 顶高 5.2 m, 跨度 8 m, 4 间总长度 16 m, 覆盖物为 4 mm 浮法玻璃, 透光率大于 88%。通风天窗位于屋脊两侧, 天窗尺寸(长 × 宽)为 2.0 m × 0.85 m, 屋顶通风面积为 20.4 m², 6 个北天窗联动, 6 个南天窗联动, 最大开度 21°, 无侧窗, 西侧有门, 尺寸为宽 2 m, 高 2.4 m。温室内种植的黄瓜处于结瓜初期, 共 5 垄, 每垄的实测平均高度为 1.6 m, 平均宽度 0.5 m, 平均行间距 1 m。

1.2 基本控制方程

自然通风条件下, 温室内空气流速较低, 其通风过程可视为 3D、非稳态、不可压缩牛顿流体运动, 流体在流动过程中遵循基于雷诺时均的质量、动量和能量守恒方程^[10]。由于风压和热压的共同作用以及温室边界的限制, 将不可避免的引起湍流现象, 考虑湍流模型的特点和合理的精确度, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟计算, 近壁处气流流动符合标准壁面函数。当外界风速小于 0.5 m/s 时, 热压(温差)通风起主要作用, 通过 Boussinesq 假设把由温差引起的浮力项加入到动量守恒方程的源项^[11]。

1.3 计算模型的选择

1.3.1 温室内辐射模型

与外部环境之间的热辐射, 温室比大多数其他建筑都要强烈, 因此在数值计算时应该考虑辐射传热过程。基于离散坐标的 DO 辐射模型对于任何的光学深度都适用, 只有 DO 模型允许出现在半透明介质(例如玻璃)内的辐射, 并且允许用户使用灰带模型来模拟非灰体辐射, 因而特别适合玻璃温室辐射换热过程的求解。DO 模型把辐射传播方程(RTE 方程)转换为空间坐标系下的辐射强度的输运方程, 对于光谱辐射强度 $I_\lambda(r, s)$, 其 RTE 方程详见文献[12]。

1.3.2 作物多孔介质模型

在数值计算中, 作物简化为六面体结构(长 × 宽 × 高)14 m × 0.5 m × 1.6 m, 5 行, 间距 1 m, 作物对环境的影响采用多孔介质模型来模拟, 假定黄瓜作物为均匀、各向同性多孔介质, 其体积孔隙率和表面孔隙率一致, 工作介质及多孔介质固体骨架的物性参数为常数^[13], 多孔介质内部辐射忽略。为了反映作物对空气拖动效应, 通过在动量方程中增加一个动量源项来模拟多孔介质的作用, 其空气动力学行为可用 Darcy - Forchheimer 定律描述

$$S_\phi = - \left(\frac{\mu}{K_p} u + \frac{C_F}{\sqrt{K_p}} \rho u^2 \right) \tag{1}$$

式中 S_ϕ ——源项 u ——空气流速, m/s
 μ ——空气的动力粘度, kg/(s·m)
 ρ ——空气的密度, kg/m³
 K_p ——多孔介质的渗透性系数, m², 取 0.395^[14]

C_F ——非线性动量损失系数

根据文献[15], 作物冠层的动量源项与冠层特征及空气流速有关, 可描述为

$$S_\phi = -I_{LAV} C_D \rho u^2 \tag{2}$$

式中 C_D ——作物冠层的阻力系数, 取 0.2^[16]
 I_{LAV} ——单位体积的叶面积指数, m²/m³, 试验期间为 1.8

Venlo 型温室自然通风状态下, 室内空气流速较低, 且空气动力粘度的数量级为 10⁻⁵, 因此可忽略式(1)的第 1 项。合并式(1)和式(2)可得关于 C_F 的计算式为

$$I_{LAV} C_D = \frac{C_F}{\sqrt{K_p}} \tag{3}$$

1.4 计算域和边界条件

计算域包括温室室内区域和室外区域 2 个部分, 室外计算域选为室内计算域的 10 倍。对于六面体结构的温室室外空间, 将迎风面设置为速度进口边界, 与之相对的面设置为压力出口边界; 室外顶面设置为对称边界, 2 个侧面设置为周期性边界。在温室室内区域中, 温室围护结构和地面设置为壁面边界条件; 温室内的天窗和西侧门都设置为内部界面边界条件。

(1) 室外温度

室外空气温度的日变化可以简化为以 24 h 为周期的简谐波运动^[17], 以 2011 年 11 月 27 日为例, 采用三阶傅里叶级数拟合室外空气温度, 图 1 为拟合曲线, 拟合均方根误差 RMSE 为 0.252 2, 决定系数 $R^2 = 0.993 4$ 。在任意时刻室外温度方程为

$$T_o(t) = 15.9 - 3.78\cos(\omega t) - 1.844\sin(\omega t) + 0.6949\cos(2\omega t) + 0.2783\sin(2\omega t) - 0.7041\cos(3\omega t) + 0.1292\sin(3\omega t) \tag{4}$$

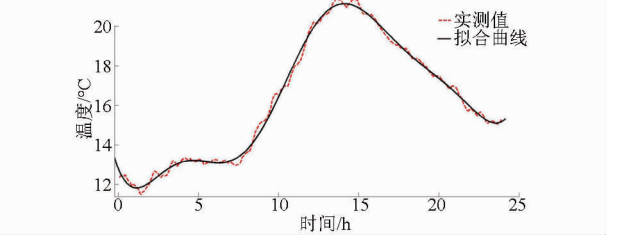


图 1 室外温度实测值和拟合曲线

Fig. 1 Measured outside temperature and fitted curve

其中 $\omega = 0.232\ 5\ \text{rad}$
式中 t ——时间, h

(2)室外太阳辐射

太阳辐射对温室环境的影响采用 Fluent 中的太阳负荷模型,选择射线跟踪方法 (Solar ray tracing) 将太阳负荷作为能量方程中热源项,设定试验温室的经纬度及朝向,结合试验时段天气状况设定云量系数,利用太阳负荷模型的太阳辐射计算 (Solar calculator) 功能,计算特定日期和地点的太阳位置及直接辐射和散射辐射。进行非稳态计算时,设定每次太阳辐射计算的更新时间间隔,即可改变太阳方位角和辐射数值,实现室外太阳辐射可变边界的设置。

(3)室外风速风向

速度进口风速符合垂直方向的对数分布率^[18]

$$U_{int} = \frac{u^* \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right)}{K}$$
$$u^* = Ku_h / \ln \left((h + z_0) / z_0 \right) \tag{5}$$

式中 U_{int} ——进口速度, m/s
 u_h ——参考速度 (2.5 m 高度的测量风速)
 z_0 ——地面摩擦因数,取 0.011
 z ——距离地面高度, m
 h ——参考高度,取 2.5 m
 K ——卡门常数,取 0.42

由于室外风速风向数据波动比较大,对每一次风速风向的变化都进行 CFD 数值计算是不现实的,气象上经常采用小时平均风速风向来描述室外自然风的变化情况,即取整个小时内采样数据的平均值,图 2 为 11 月 27 日 24 h 平均风速风向的测量值。

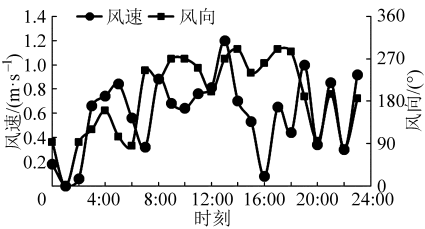


图 2 室外风速风向

Fig. 2 External wind speed and direction

1.5 初始条件和计算方法

温室自然通风过程中,太阳辐射是温室能量的主要来源,考虑太阳辐射对温室内热环境的影响,模拟 2011 年 11 月 27 日 7:00 ~ 17:00 天窗和西侧门全开状态下的温室内热环境。数值计算采用有限容积法,首先采用 SIMPLE 算法求解 7:00 室内温度稳态解,稳态求解结束后,以收敛的稳态解作为初始条件,选用 PISO 算法进行非稳态计算,时间离散选用二阶隐式,步长设为 5 s,每个时间步的最大迭代步

数设为 30 步。

2 验证试验

验证试验于 2011 年 11 月 25 日 ~ 12 月 1 日在南京农业大学工学院院内的试验温室内进行,如图 3 所示。室外气象参数由瑞研智华 RYQ-1 型自动气象站采集并自动存储,采集时间间隔为 1 min,其中空气温度测量范围 -30.0 ~ 70.0℃,测量精度 ±0.2℃;空气相对湿度范围 0 ~ 100%,测量精度 ±3%;风速范围 0 ~ 32.4 m/s,测量精度 ±1.0 m/s;辐射范围 0 ~ 2 000 W/m²,测量精度 1 W/m²;风向范围 0 ~ 360°。室内温度、相对湿度由南京农业大学工学院自行开发的基于 ZigBee 的无线传感器网络温室监控系统采集,每 1 min 记录一次数据,温、湿度传感器型号为 AM2301,测量范围 0 ~ 100%、-40.0 ~ 80.0℃,测量精度 ±3%、±0.5℃。



图 3 试验 Venlo 温室

Fig. 3 Experiment Venlo greenhouse

温室内共设置 7 个温湿度监测点,每个位置沿垂直方向分 3 层布置 3 个传感器,具体高度 y 取 0.2、1.4、2.4 m,分别表征地面层、冠层和温室中间层。温室内空气温湿度监测点布置及各点空间坐标如图 4 所示,图中 x 正向为正南方向, z 方向为正西方向, y 指向天空,沿长度、跨度及高度方向温室共布置 21 个温湿度传感器。考虑到试验 Venlo 温室自然通风降温过程中,只有天窗通风,没有侧窗通风口,通风比仅 8.25%,室内的空气流动很缓慢,通风性能极差,因而在自然通风降温过程中,西侧墙大门始终保持全开的状态,以增大通风量,提高温室自然通风降温性能。

3 试验结果与分析

3.1 模型验证

图 5 为各时刻所有测点室内气温实测值和模拟值的误差分布图,模拟值和实测值的误差介于 -1.79 ~ 1.88℃ 之间,均方根误差 RMSE 为 0.688℃,最大相对误差为 8.9%,平均相对误差为 2.8%。图 6 为温室空间 3 个层面各测点模拟值和

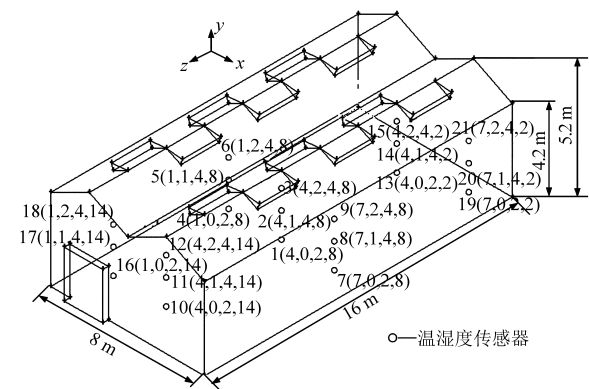


图 4 温室内温湿度测点布置图

Fig. 4 Distribution of temperature and humidity measurement points in the greenhouse

实测值平均值的比较,由图 6 可知,室内温度变化趋势和室外温度基本一致,室内外平均温差模拟值和实测值分别为 3.09℃和 3.37℃,位于 $y = 0.2\text{ m}$ 、 $y = 1.4\text{ m}$ 和 $y = 2.4\text{ m}$ 高度的各测点模拟值平均值和实测值平均值最大相对误差分别为 6.5%、3.8% 和 4.6%。模拟值和实测值吻合良好,所建 CFD 模型有效,可以比较准确地描述室内温度随室外气候条件变化的规律。

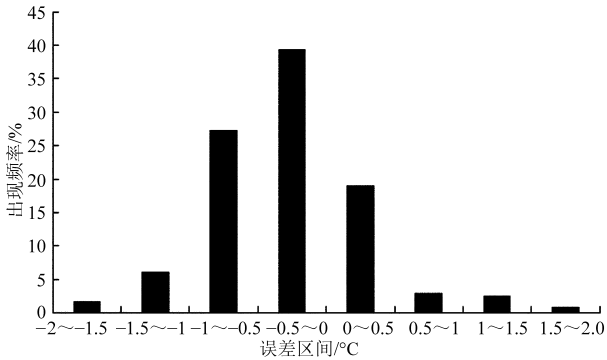


图 5 模拟值与实测值误差分布

Fig. 5 Error distribution of measured and simulated temperatures

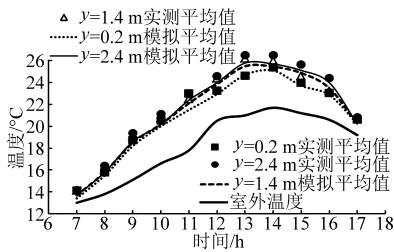


图 6 温室内温度模拟值和实测值

Fig. 6 Simulated and measured temperature inside the greenhouse

以 12:00 为例,对 CFD 数值模拟结果进行较为详细地分析。图 7 为温室中心横向截面(南北方向)和温室中心纵向截面(东西方向)各测点模拟值与实测值比较。由图 7a 可知,温室南侧温度高于北侧温度,这是由于室外冷空气由西侧门进入温室,受

气流流动模式影响温室北侧温度较低,且南边接收的辐射较多,因而其气温超过北边,同一高度模拟值南北最大温差 3.35℃,实测值最大温差 3.1℃。位于温室底层 $y = 0.2\text{ m}$ 、冠层 $y = 1.4\text{ m}$ 和温室中间层 $y = 2.5\text{ m}$ 3 个高度平面的各测点模拟值和实测值平均误差为 0.49、-0.1、-0.35℃。由图 7b 可知,温室东西温差较小,西侧温度稍高于东侧温度,且靠近东侧墙和西侧墙的测点温度高于温室中心温度,同一高度模拟值和实测值东西最大温差分别为 0.7℃和 0.5℃,底层、冠层和温室中间层各测点模拟值与实测值平均误差分别为 0.52、0.14、-0.31℃。从温室高度方向看,温室底层土壤上方 0.2 m 处温度较低,冠层和中间层温差不大,同一位置最大垂直温差模拟值和实测值分别为 0.74℃和 1.3℃。由以上的分析可知,温室南北温差大于东西温差,垂直方向存在温度梯度,数值模拟可以真实地反映温室内温度空间分布特点。

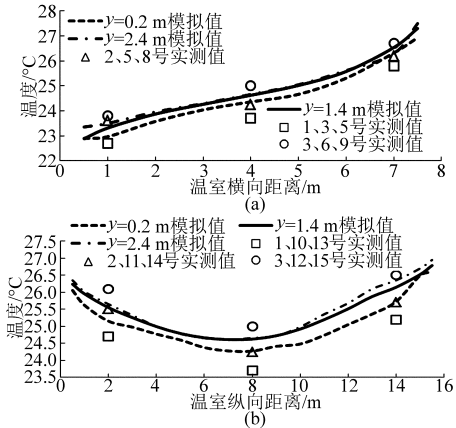


图 7 温室横向中心截面和纵向中心截面模拟值和实测值

Fig. 7 Simulated and measured temperature of central transverse and longitudinal section in greenhouse
(a) 横向中心截面 (b) 纵向中心截面

3.2 室外气候参数阶跃变化下的温室环境非稳态分析

通过非稳态模拟,不仅能获得模拟周期内室内温度的连续变化规律,而且可以预测温室环境系统遇到扰动下的动态特性。如图 2 所示,13:00 室外风速从 0.81 m/s 跃变为 1.2 m/s,风向由西南偏南 20°转变为西风,室外气温为 20.6℃,室外风速发生跃变的时刻记为 0 s。选取西侧门和天窗都存在的 $x = 1.5\text{ m}$ 截面和作物冠层 $y = 1.4\text{ m}$ 截面,两截面的暂态气流速度矢量图和温度场空间分布云图如图 8 和图 9 所示。

由图 8a 可知,温室西侧门口附近区域的气流速度出现了先增大后减小的变化模式,3 min 后由 10 s 的 1.4 m/s,减小为约 1 m/s,温室东部上部气流速度明显上升,由于东侧墙的阻挡,逐渐在东侧墙和

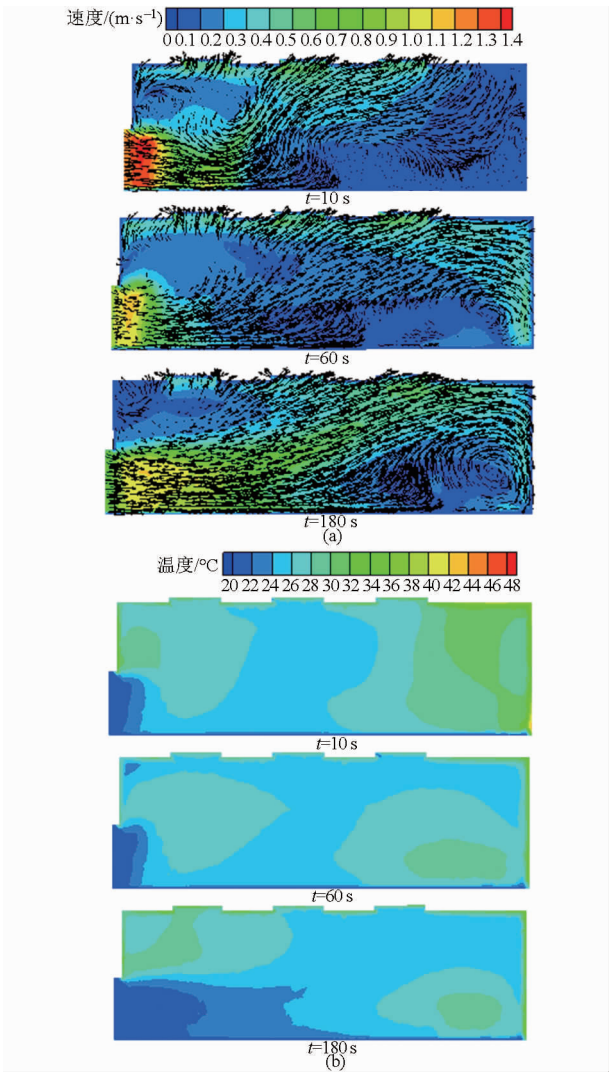


图 8 $x = 1.5\text{ m}$ 截面气流速度矢量图和温度瞬态分布云图

Fig. 8 Transient distribution of airflow velocity vector and temperature at $x = 1.5\text{ m}$ section

(a) 气流速度矢量图 (b) 温度分布云图

地面之间出现了低速回流,温室内东侧下部出现涡流,随着冷空气沿气流方向在室内的扩散,可以从图 8b 中看到西侧门附近的 $20\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温带逐渐扩大,东侧温度明显降低,180 s 后截面平均温度由 10 s 的 $26.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $25.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

室外风速风向的变化对作物冠层的影响如图 9 所示,进入温室的冷空气由于作物的阻挡,沿西侧墙作物茎间自西向东移动并向温室中部扩散,受气流运动模式的影响,西侧门进风口附近的栽培作物受室外风速的影响较大,其他种植区的气流速度基本维持在 $0\sim 0.1\text{ m/s}$,同时东侧墙附近无作物区域气流速度由 0 m/s 增加至 180 s 的 0.2 m/s ,东侧无作物区域温度明显下降,冠层平均温度 180 s 后从 $27.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降至 $27.03\text{ }^{\circ}\text{C}$,由此可见,风速风向的变化对温室内自然通风降温效果影响显著。

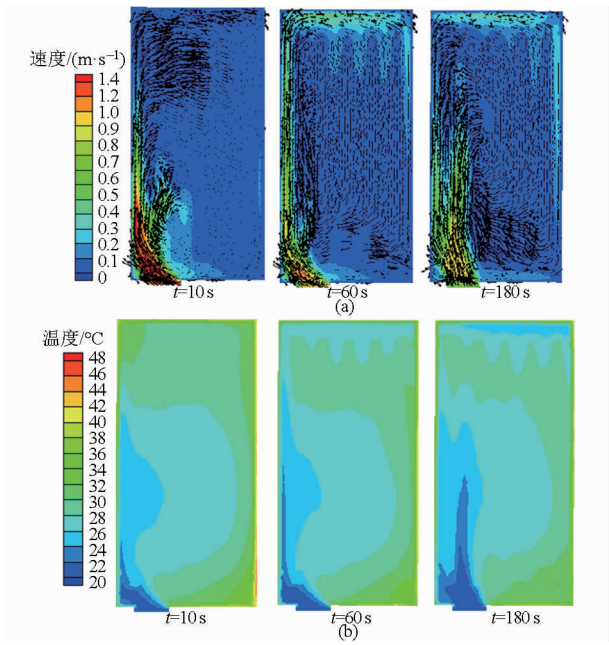


图 9 $y = 1.4\text{ m}$ 截面的气流速度矢量图和温度瞬态分布云图

Fig. 9 Transient distribution of airflow velocity vector and temperature at $y = 1.4\text{ m}$ section

(a) 气流速度矢量图 (b) 温度分布云图

4 结论

(1)以室外风速、风向、温度和太阳辐射作为随时间连续变化的边界条件,建立了连续时间域内 Venlo 温室自然通风 3D 非稳态 CFD 模型。通过把模拟值和实测值进行对比分析,模拟值和实测值的均方根误差 RMSE 为 $0.688\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大相对误差为 8.9% ,平均相对误差为 2.8% ,模拟值和实测值吻合良好,所建立的 CFD 模型有效,可以比较准确地描述室内温度随时间变化的规律和空间分布特性。

(2)当温室环境系统受到干扰,室外风速由 0.81 m/s 增大到 1.2 m/s ,风向由西南偏南转变为西风时,温室西侧迎风口局部风速出现了先增大后减小的变化模式,东部区域上部气流速度明显上升,除了处于西侧迎风口附近的栽培作物受室外风速的影响较大外,其它作物区域气流速度维持在 $0\sim 0.1\text{ m/s}$ 范围内, $x = 1.5\text{ m}$ 截面和作物冠层 $y = 1.4\text{ m}$ 截面平均温度分别下降了 $1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$,室外风速风向对温室通风降温效果影响显著。

(3)所建立的 CFD 非稳态模型,从 2 个时间尺度上模拟预测温室内温度的变化规律,从整个模拟周期上看,获得了温室温度随室外气候参数和时间的变化规律,以 s 为时间单位的预测结果提供了温室环境系统对外界环境变化的动态响应特性。在试验周期和试验设备受限制的条件下,CFD 模拟可充当虚拟试验系统,弥补物理试验的不足,为温室环境建模和控制提供更多的过程信息。

参 考 文 献

1 杨卫中. 温室环境智能控制关键技术研究开发与开发[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.

2 李永博,周伟,汪小昆,等. 基于奇异摄动理论的综合温室控制系统设计[J]. 农业机械学报,2012,43(5):184 – 189.
Li Yongbo, Zhou Wei, Wang Xiaochan, et al. Greenhouse control system design based on singular perturbation theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 184 – 189. (in Chinese)

3 郝飞麟, 沈明卫, 张雅. 单栋塑料温室内温度场 CFD 三维稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 222 – 228.
Hao Feilin, Shen Mingwei, Zhang Ya. 3-D Steady simulation of temperature pattern inside single plastic greenhouse using CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 222 – 228. (in Chinese)

4 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)

5 陈教料,胥芳,张立彬,等. 基于 CFD 技术的玻璃温室加热环境数值模拟[J]. 农业机械学报,2008,39(8):114 – 118.
Chen Jiaoliao, Xu Fang, Zhang Libin, et al. CFD-based simulation of the temperature distribution in glass greenhouse with forced-air heater[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(8):114 – 118. (in Chinese)

6 程秀花, 毛罕平, 倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. 农业机械学报,2011,42(2):173 – 179.
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Ni Jun. Numerical prediction and CFD modeling of relative humidity and temperature for greenhouse – crops system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):173 – 179. (in Chinese)

7 佟国红,李保明,David M Christopher,等. 用 CFD 方法模拟日光温室温度环境初探[J]. 农业工程学报,2007,23(7):178 – 185.
Tong Guohong, Li Baoming, David M Christopher, et al. Preliminary study on temperature pattern in China solar-greenhouse using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(7):178 – 185. (in Chinese)

8 佟国红,David M Christopher. 墙体材料对日光温室温度环境影响的 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):153 – 157.
Tong Guohong, David M Christopher. Simulation of temperature variations for various wall materials in Chinese solar greenhouses using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(3):153 – 157. (in Chinese)

9 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]. 农业机械学报, 2012, 43(11):186 – 191.
He Keshi, Sun Lijuan, Huang Zhenyu, et al. Optimization of vent configuration for ventilation dehumidification in multi-span plastic greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11):186 – 191. (in Chinese)

10 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: 125.

11 王启杰. 对流传热传质分析[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.

12 Fluent Inc. FLUENT 6.3 documentation[M]. Lebanon NH: Fluent Inc. , 2006.

13 江利锋, 叶宏. 植被红外特征的多孔介质模拟[J]. 计算物理,2010,27(2):245 – 250.
Jiang Lifeng, Ye Hong. Vegetation infrared simulation with porous material[J]. Chinese Journal of Computational Physics,2010, 27(2):245 – 250. (in Chinese)

14 Bartzanas T, Boulard T, Kittas C. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect proof screen in the openings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 – 3): 207 – 221.

15 Bruse M. Development of a numerical model for the simulation of exchange processes between small scale environmental design and microclimate in urban areas [D]. Bochum: University of Bochum, 1998.

16 Bruse M. Development of a micro-scale model for the calculation of surface temperature in structured terrain [D]. Bochum: University of Bochum, 1995.

17 吕政, 唐海萍. 全年典型年气象数据的拟合及其建筑负荷分析中的应用[J]. 制冷与空调, 2005(2):12 – 16.

18 Majdoubi H, Boulard T, Fatnassi H, et al. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6 – 7): 1050 – 1062.

19 郝飞麟,沈明卫,何勇,等. 单栋塑料温室内多因子综合 CFD 稳态模拟分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):297 – 304.
Hao Feilin, Shen Mingwei, He Yong, et al. Three dimensional steady simulation of microclimate pattern inside single plastic greenhouse using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9): 297 – 304. (in Chinese)

Unsteady Temperature Simulation under Variable Boundary
Conditions for Venlo Type Greenhouse

Zhou Wei^{1,2} Wang Xiaochan¹ Li Yongbo¹
(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China
2. Mechanical and Transportation Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumchi 830052, China)

Abstract: 3-D unsteady mathematical model of natural ventilation condition in Venlo type greenhouse was built up by CFD method. The boundary conditions were based on solar radiation, external air temperature, wind velocity and direction changing over time. The result shows that the inside temperature change had the same variation tendency with the outside temperature change during the whole simulation period. The mean temperature difference of the indoor and outdoor temperature was 3.09℃. RMSE of the simulated and measured value was 0.688℃. The maximum relative error and the average relative error was 8.9% and 2.8%, respectively. The CFD-based model could accurately represent the temporal and spatial variation of indoor temperature. When the outside wind speed changed from 0.81 m/s to 1.2 m/s and the wind direction changed from south-southwest to west, the local airspeed near the west windward entrance firstly increased and then decreased. The airflow speed in the east area was markedly increased. The average temperature of $x = 1.5$ m cross section at the entrance of ventilation and crop canopy dropped 1.87℃ and 0.92℃ in 180 s. Cooling effect of natural ventilation was remarkably affected by wind speed and direction.

Key words: Venlo greenhouse Temperature field 3-D unsteady CFD



(上接第 297 页)

16 钟建国, 吴冬梅. 基于二值自适应算术编码的图像无损压缩算法研究[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2007, 35(1): 30–33.
Zhong Jianguo, Wu Dongmei. Research on image lossless compression method based on adaptive bit-level arithmetic coding[J]. Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition, 2007, 35(1): 30–33. (in Chinese)

17 张雄明. 低内存需求的图像压缩关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
Zhang Xiongming. Contributions to image compression with low-memory requirement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

Image Compression Method with Low Memory Cost on Sensor Nodes of WMSN

Lu Mingzhou¹ Shen Mingxia¹ Liu Zhiqiang¹ Liu Longshen¹ Yang Xiaojing² Wang Yu³

(1. Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China 2. Key Laboratory of Animal Physiology and Biochemistry, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China 3. School of Information Science and Engineering, South East University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Based on bit plane and adaptive binary arithmetic coding, a wavelet coefficients coding scheme which could match the line-based wavelet transform efficiently was proposed. The MCU of the image sensor node read image data from FIFO line by line, executed multi-level wavelet transform, determined the quantization value according to the probability distribution of the wavelet coefficients in different level, performed adaptive binary arithmetic coding based on four binary probabilistic model and realized image compression based on wavelet transform with a low cost of SRAM. The image compression method was applied to handle a 320 pixels×240 pixels gray image of piglets. Experimental results show that the SRAM cost, time cost and the PSNR was 5.749 KB, 16.312 s and 39.72 dB respectively when the quantization value was set to three. This study established the foundation for agricultural image transmission over the low bandwidth WMSN efficiently.

Key words: Multimedia sensor network Image compression Low memeory coefficient coding Bit plane Binary arithmetic encoding