

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.029

基于 CFD 模拟模型的温室温度场均匀性控制*

李永博^{1,2} 周伟¹ 李鹏飞¹ 汪小崑^{1,2} 丁为民^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

【摘要】 为达到精确控制温室环境因子的目的,提出一种基于计算流体力学(CFD)模拟模型的试验设计(DOE)优化控制系统,通过正交试验设计,在尽可能少的 CFD 求解次数下,获得环境因子控制的最优组合;以温度场控制为例,通过引入均匀性评价指标,以 CFD 为计算工具不断改变控制输入的组合,使该指标达到极小,从而在原有温度定值控制基础上,使温室作物温度生长的局部差异减小,提高温室综合生产效率;最后以试验实例给出了这种方法求解的基本过程,结果表明优化后的效果明显,控制组合方式易于获得。

关键词: 温室控制 CFD 试验设计 温度场 均匀性

中图分类号: S625.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0156-06

Temperature Homogeneity Control of Greenhouse Based on CFD Simulation Model

Li Yongbo^{1,2} Zhou Wei¹ Li Pengfei¹ Wang Xiaochan^{1,2} Ding Weimin^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China 2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

In order to achieve precise control effect of greenhouse environmental factors, an innovative optimization control system arithmetic based on CFD was presented. By using orthogonal experiment in DOE, controller design in the optimal system was obtained, meanwhile, iteration times of CFD could be reduced as soon as possible. Taking control temperature field as an example, through setting up temperature distribution index and making its minimum by the strategy of using iterative algorithm with CFD calculated, the difference of temperature distribution could be decreased. The greenhouse comprehensive production efficiency was improved. Lastly, an experiment was illustrated by proposed method. The results showed that the algorithm was proved to achieve the control law easily.

Key words Greenhouse control, CFD, DOE, Temperature field, Homogeneity

引言

在温室生产实践中,经常发现内部作物具有区域性的生长差异,品质不一,造成综合产量不高^[1],用 Tomgro 模型模拟可以看出在温室中间区域的作物生长速度快、产量高、品质好;相反,在温室边上的作物生长速度较慢、产量较低、品质变差^[2]。对于一个生产用温室而言,在控制系统设计时认为内部

空气是经过充分混合、各处均一的气团^[3],采用的控制模型仍类同于工业控制,如传递函数^[4]、状态空间^[5]、智能控制系统^[6],而这些模型的特点均是针对环境中固定点的变量(环境因子),考虑在设定值下的控制效果,然而温室的控制目标是内部的环境系统,表现形式应该是一个场,因此要想进一步提高温室的控制效果,使得温室整个空间的设施作物都尽可能在最优环境下生长,将控制对象从一

收稿日期: 2011-07-05 修回日期: 2011-09-20

* 国家自然科学基金资助项目(60971106)、江苏省农机局、南京农业大学工学院科研启动基金资助项目(rcqd10-01)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ2011024)

作者简介: 李永博,博士后,主要从事农业生物环境控制研究,E-mail: bewit@njau.edu.cn

个点拓展到场是作物生产取得高产高效的重要保证。

为了达到精确控制整个空间环境参数的目的,原有的系统模型显然已经不能满足要求,必须选用新的模型。近几年发展起来的计算流体动力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 在温室环境模拟中得到广泛应用^[7-9], 这种方法能够给出温室中任一点的环境因子特征, 有利于从细节上掌握整个温室作物的生长环境, 而目前这种技术还多用于温室物理结构的设计^[9-10]。因此若能将 CFD 模拟与控制技术结合起来, 以 CFD 模拟模型代替原有系统模型, 引入状态反馈概念, 优化不同控制输入的组合方式, 使整个温室作物生长在最佳环境之中, 将会提高温室生产的综合效率。

基于上述分析, 本文首先针对具体的试验温室控制特征, 提出一种基于 CFD 模拟模型的普适性温室环境因子控制方法; 然后以温室中温度场为控制对象, 在自然通风条件下进行模拟, 引入评价温室温度场的均匀性指标, 考虑到 CFD 模拟的复杂性和耗时性, 采用试验设计 (design of experiment, 简称 DOE) 中的正交数组方法, 以保证尽可能少的 CFD 运行次数得到尽可能多的控制信息; 最后通过仿真试验求取温度场指标最优下的控制组合。

1 温室物理模型

温室位于东经 118°46'、北纬 32°03', 为三脊 Venlo 型铝合金玻璃温室。4 间跨度 8 m, 肩高 4.2 m, 顶高 5.2 m, 总长度 16 m, 面积 128 m², 覆盖物为 4 mm 浮法玻璃, 透光率大于 88%, 设有开窗系统、外遮阳系统、内遮阳系统、喷雾系统和滴灌系统等, 6 个北天窗联动, 6 个南天窗联动, 具体物理结构如图 1 所示。

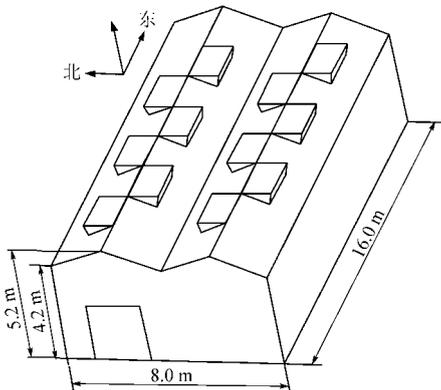


图 1 温室物理结构

Fig. 1 Physical structure of greenhouse

本文模拟自然通风条件, 温室主要能量来源于太阳辐射, 假定外覆盖玻璃层温度分布均匀, 屋顶和

侧面设为半透明介质, 地面为混凝土结构, 各壁面对辐射能吸收率为常数, 传热以固定系数进行计算, 采用三维 CFD 模拟。

2 CFD 模型方程

采用 CFD 软件为 Gambit 2.4.6 和 Fluent 6.3.26, 前者用于网格划分, 后者用于流体计算, 其中涉及到基本方程、三维湍流方程、辐射方程。

2.1 基本方程

通用的守恒方程为^[11]

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi\mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中 ρ ——密度 φ ——通用变量

t ——时间 \mathbf{v} ——速度矢量

Γ_{φ} ——广义扩散系数 S_{φ} ——源项

$\varphi = 1$ 时, 该方程为连续方程; $\varphi = \mathbf{v} = [u \ v \ w]$ 时, 该方程为动量方程; $\varphi = t$ 时为能量方程同, 其中 u, v, w 是 \mathbf{v} 在 3 个方向的速度标量。

2.2 三维湍流方程

由文献[12]可知, 温室中的空气流动视为湍流是合适的, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型^[13], 表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_{\varepsilon} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon} + S_{\varepsilon} \quad (3)$$

R_{ε} 为 ε 的附加项, 表示为

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu} \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = \rho C_{\mu} k^2 / \varepsilon$$

$$C_{\mu} = 0.0845 \quad \alpha_k = \alpha_{\varepsilon} = 1.39$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 \quad C_{2\varepsilon} = 1.68$$

式中 k ——湍动能 ε ——耗散率

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——经验常数

C_{μ} ——模型常数

G_k ——平均速度梯度引起的湍动能

G_b ——浮力引起的湍动能

Y_M ——可压速湍流脉动膨胀对总耗散率的影响

$\alpha_k, \alpha_{\varepsilon}$ ——湍动能 k 和耗散率 ε 的有效湍流普朗特数的倒数

S_k, S_{ε} ——用户自定义的源项, 参数设置见文献[13]

2.3 辐射方程

选取离散坐标辐射 (DO) 模型来建立温室热环

境模型。DO 模型把沿 s 方向传播的辐射方程 (RTE) 视为某个场方程, 具体模型为^[13]

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{s}) + (\alpha_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \alpha_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\theta \quad (4)$$

其中

$$I_{b\lambda} = \sigma T^4 / \pi$$

式中 I_λ ——波长的辐射强度

\mathbf{r} ——位置矢量 \mathbf{s} ——方向矢量

\mathbf{s}' ——散射方向矢量 T ——温度

α_λ ——光谱吸收系数

σ ——Stefan - Boltzmann 常数, 为 Planck 函数给出的黑体强度

σ_s ——散射系数 n ——折射率

ϕ ——相函数 θ ——辐射的立体角

3 温度场均匀性指标

温度是温室环境控制中最重要的参数。以前的研究均用某一温度数值来评价整个温室的环境温度, 但是从园艺学可知^[14], 作物生长时对土壤、叶面层、冠层等高度的温度需求是不一样的, 因此单纯用一个数值来表征整个空间的温度是不精确的, 必须引入能够评价不同层面作物温度要求的指标。

本文在整体温度控制基础上引入温度场均匀性指标, 作用是表征不同作物高度对温度的要求, 以实现精确控制的目的。此处的温度场均匀性包含两层含义: 某高度平面温度场的均匀性和垂直温度梯度场的均匀性。

3.1 平面温度场均匀性指标

对于某高度平面温度场引入温度均方差来衡量其均匀性, 即

$$J_h = \frac{\sqrt{\iint (T - T_a)^2 dx dy}}{A} \quad (5)$$

其中

$$T_a = \frac{\iint T dx dy}{A} \quad (6)$$

式中 x, y ——温室平面坐标

J_h ——温室平面均匀性指标

A ——平面面积

T_a ——该面平均温度

在温室温度控制中, 若只有一种作物, 易知控制目标应为 $J_h = 0$ 。

3.2 垂直温度梯度场均匀性指标

为了表达作物生长中对不同高度温度需求的不一致性, 在垂直方向引入温度梯度指标加以衡量为

$$J_v = \text{grad } z \quad (7)$$

式中 z 为温室垂直方向坐标。对于确定作物, 这一

指标可根据园艺学获得, 与 J_h 不同, J_v 的期望值应该是一个定值, 而不应该是零。

上述从两个方向分别对温室温度场的均匀性进行了评价, 均是连续系统的思想, 在实际系统设计中, 可选择有限的离散层作为系统指标, 比如地面层、中间层、冠层等几个关键层来评价。

4 CFD 模拟模型设置

4.1 边界条件及初始条件

通过与实验数据的对比建立 CFD 模拟模型, 如图 1 所示, 本文设置 1 个速度入口 (西墙), 12 个天窗压力出口, 5 个玻璃壁面, 1 个混凝土壁面 (地面), 计算域定义为流体类型。在 Gambit 中对入口、出口和局部壁面进行网格加密, 采用不规则区域离散划分的非结构化网格, 可得到为 Fluent 计算提供的网格文件。当入口和天窗全开时生成 167 940 个节点, 930 148 个体单元, 此时的网格整体效果如图 2 所示, 在 Fluent 对应模型初始条件和边界条件设置如表 1 所示。

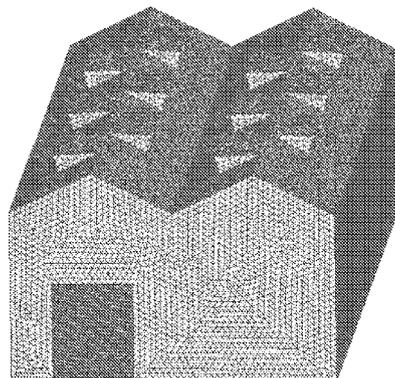


图 2 网格划分图

Fig. 2 Gridding of greenhouse

4.2 材料及求解控制参数

地面混凝土选择 Fluent 材料库中的碳酸钙为壁面, 厚度为 0.004 m。仿真时间为 6 月 21 日 13 时, 云量系数为 1, 光谱分数为 0.5, 直接太阳辐照为 1423 W/m^2 , 漫射太阳辐照为 200 W/m^2 ; 采用基于压力的稳态模型, 压力速度耦合采用 Simple 方式, 压力方程离散选用标准格式, 动量、能量、DO、湍流方程采用一阶向上格式, 欠松弛因子设置如表 2 所示。

5 控制系统设计

国内外研究者的结果已经证明: CFD 技术是温室环境系统模拟的一种有效工具^[6,8-10,16]。同样本文所研究的温室 CFD 模拟模型已经在试验中得到验证, 具体技术方法参见文献[15], 此处的重点是

利用已建立的 CFD 模拟模型去探讨控制器设计,以提高温室环境因子的控制精度。下面以第 1.1 节中的物理温室为例,采用第 4 节中的 CFD 模拟模型,说明引入温度场均匀性指标后的控制系统设计方法。

表 1 初始条件和边界条件

Tab.1 Initial and boundary conditions

条件类型	参数	数值
空气	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.225
	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.024 2
	热膨胀系数/ K^{-1}	3.356×10^{-3}
	比热容/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	1 006.43
玻璃	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 220
	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	1.15
	比热容/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	830
	厚度/ m	0.004
边界条件	入口速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.0
	入口温度/ K	300
	室外温度/ K	305
	玻璃壁面温度/ K	300
	地面壁面温度/ K	290

表 2 欠松弛因子设置

Tab.2 Under-relaxation factors

模型类型	因子	数值
基本方程	压力	0.3
	密度	1.0
	动量	0.7
湍流	湍流粘度	1.0
	湍流能量	0.8
	湍流比率	0.8
其他	能量	1.0
	体力	1.0
	离散相	1.0

5.1 控制系统描述

基于 CFD 的温室环境因子控制系统原理如图 3 所示,其中系统输入是经过状态反馈后温室控制所关心的 CFD 计算结果(环境因子特征),将这些结果输入到控制器中,经过 DOE 优化控制系统对指标的计算得到控制输出:几何尺寸、初始条件和边界条件,前者用于网格生成,后者用于 CFD 计算,这两类控制输出根据实际控制系统需要可以任选其一,或二者均选,具体在于温室的调控手段。

本试验温室控制量及其范围为:北天窗开度 $u_1:0 \sim 100\%$ (最大开度 23° ,面积 $0.8 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$)。

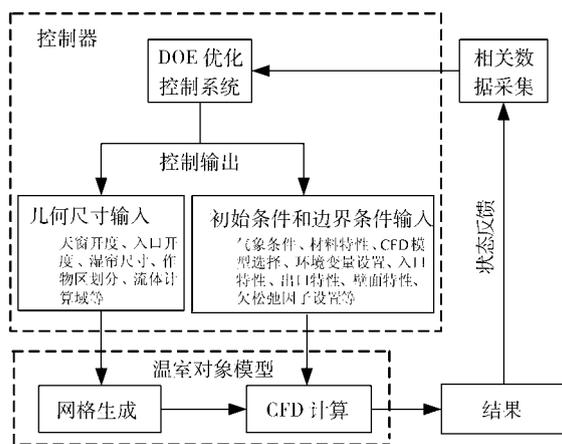


图 3 DOE 温室优化控制系统原理图

Fig.3 DOE greenhouse optimization control

南天窗开度 $u_2:0 \sim 100\%$ (最大开度 23° ,面积 $0.8 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$)。入口开度 $u_3:0 \sim 100\%$ (面积 $2.0 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$)。

在 DOE 优化控制系统中,将温室外气象环境测量结果转换为 CFD 模拟模型的初始条件和边界条件,采用 DOE 温室优化控制系统,在不同控制量组合输入下得到系统响应结果,通过分析结果获得最佳 u_1, u_2 和 u_3 的组合方式,将其结果用于实际的温室控制。

5.2 控制指标确定

将第 3 节中指标离散化,取 m 层作物评价指标,其中 $m = 1, 2, \dots, k$,可根据园艺学指标来适当选取 m 值,第 k 层的作物温度均匀性指标为

$$J_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_k - T_a^k)^2} \quad (8)$$

式中 N ——第 k 层共选取的温度点数

T_k ——第 k 层的平均温度

T_a^k ——每个 CFD 采样点的温度

总均匀性评价指标为

$$J = \sum_{i=1}^k \lambda_i J_i \quad (9)$$

式中 λ_i 为第 i 层温度的权重系数,表征该层温度在整个指标中的比重,满足 $\sum \lambda_i = 1$ 。

5.3 控制律求解

求解下述优化问题可得到控制律为

$$\min J = \min \sum_{i=1}^k \lambda_i J_i \quad (10)$$

s. t. $0 \leq u_i \leq 100\%$

其中 $i = 1, 2, 3, T_k \in Q$,其中 Q 为平均温度控制目的区间。

5.4 DOE 试验设计

取 $k = 3$ 分别表示第 1 层(高度 0.2 m)、第 2 层(高度 1.0 m)、第 3 层(高度 2.0 m),每层的权重系

数分别为 $\lambda_1 = 0.4$ 、 $\lambda_2 = 0.3$ 、 $\lambda_3 = 0.3$ 。通过 DOE 温室优化控制系统求解第 5.3 节的极值问题,其中对于 3 个控制变量分别进行 4 水平试验(表 3),共计 64 次计算,得到的结果如图 4~7 所示。

表 3 正交试验设计

Tab.3 Design of orthogonal test %

水平	因素		
	u_1	u_2	u_3
1	17.39	19.13	20
2	34.78	38.26	40
3	52.17	57.39	60
4	69.56	76.52	80

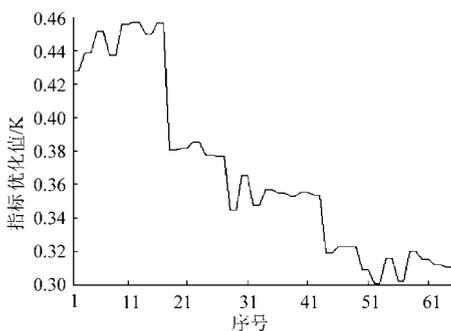


图 4 总体优化的指标曲线

Fig.4 Whole optimization index

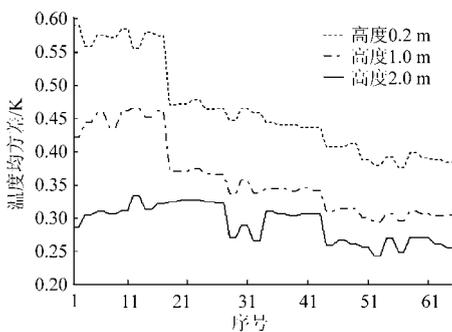


图 5 每层温度均方差

Fig.5 Standard deviation of different layers

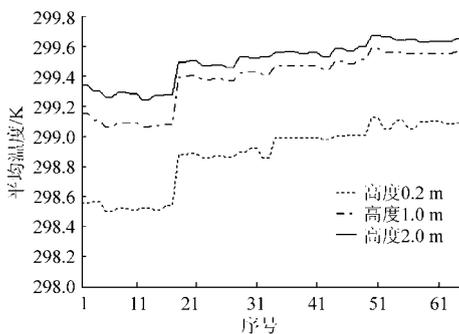


图 6 每层平均温度

Fig.6 Average temperature of different layers

图 4 为优化过程中温度场均匀性总体指标变化,从中可以看出在第 51 次 DOE 试验中,均匀性指

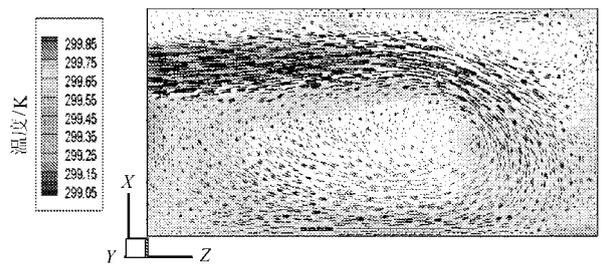


图 7 第 51 次 DOE 试验时高度为 1.0 m 温度分布
Fig.7 Temperature distribution when height was 1.0 m
(the 51st time)

标最小达到 0.313 K,对应的 3 层子指标分别为 0.379 K(第 1 层)、0.294 K(第 2 层)、0.243 K(第 3 层),从试验设计中可以看出此时的控制量分别为 $u_1 = 13.3\%$ 、 $u_2 = 55.0\%$ 、 $u_3 = 80.0\%$ 。

可以看出南、北天窗的开度并不一样,这是由于温室通风入口靠北的几何结构决定的,因此想达到温度场均匀化,南天窗开度要大于北天窗,这样才能满足空气流动的平衡。

图 5 是 3 层温度均方差变化情况;图 6 是试验过程中 3 层平均温度的变化,可以明显看出温度的分层效果;图 7 为第 51 次 DOE 试验时、高度为 1.0 m 处的 CFD 模拟温度速度场,从图中可以看出温度分布和湍流现象,温度范围从 299.05 ~ 299.85 K,相差 0.8 K,优化结果 $J = 0.313$ K 达到极小。

6 结论

(1) 采用 CFD 模拟模型的温室环境因子优化控制系统是可以实现的,这种方法在不增加硬件的基础上可进一步提高温室控制效果,达到精确控制的目的。

(2) DOE 方法的采用对于温室控制是合理的,因为目前利用计算机进行温室 CFD 模拟比较耗时,特别是复杂模型中无法控制次数的连续迭代而显得尤为突出,而 DOE 方法的引入可以根据需要人为控制 CFD 循环次数,在耗时与精度之间取得一个平衡,在线运行时提供实时输出,离线运行时提供数据库支持。

(3) 以温度场均匀性为对象详细阐述了控制实现的具体思路和步骤,这种方法对于其他温室环境因子可平行推广,不同之处仅在于因子指标的确定。

(4) 在目前计算机运算能力下,实现文中控制还要考虑两个方面因素:一是模型的简化,抓住问题主要矛盾,尽可能减少 CFD 计算方程;二是网格划分的无关性,在保证计算结果准确的基础上,尽可能的加大网格尺寸。

参 考 文 献

- 1 王吉庆,张百良.几种降温措施在温室夏季降温中的应用研究[J].农业工程学报,2006,22(9):257~260.
Wang Jiqing, Zhang Bailiang. Application of some cooling measures for greenhouse cooling in summer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 257~260. (in Chinese)
- 2 Carlos R B, Rodrigo G, Alexander C. Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2): 219~227.
- 3 Udink ten Cate A J. Modeling and adaptive control of greenhouse climate[D]. Wageningen: Agricultural University, 1983.
- 4 Albert Setiawan, Louis D Albright, Richard M Phelan. Application of pseudo-derivative-feedback algorithm in greenhouse air temperature control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 26(9): 283~302.
- 5 Bennisa N, Duplaix J, Eneab G, et al. Greenhouse climate modelling and robust control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 96~107.
- 6 Fathi Fourati, Mohamed Chtourou. A greenhouse control with feed-forward and recurrent neural networks[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(8): 1 016~1 028.
- 7 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): 1 050~1 062.
- 8 Tong G, Christopher D M, Li B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 129~139.
- 9 王健. 互插式连栋温室优化设计与通风试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2007.
Wang Jian. Optimal design and ventilative test of mutual insert multi-span greenhouse[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics[M]. London: Longman Group Ltd., 1995.
- 12 Sase S. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse[J]. Acta Horticulturae, 1984(148): 329~336.
- 13 Fluent Inc. FLUENT 6.3 documentation[M]. Lebanon NH: Fluent Inc., 2006.
- 14 李全胜, 庞振潮. 不同下垫面和农田作物群体中的小气候研究[J]. 浙江气象科技, 1991, 12(1): 35~38.
- 15 何国敏. 现代化温室温度场数字化模拟研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- 16 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)

(上接第 172 页)

- 15 杨其长. 荷兰温室环境调控技术进展[J]. 农业工程技术:温室园艺,2006(12):8~9.
- 16 冯广和. 温室的节能问题[J]. 农业工程技术:温室园艺,2004(5):23~25.
- 17 Winspear K W. Vertical temperature gradients and greenhouse energy economy[J]. Acta Horticulture, 1978(76):97~104.
- 18 Popovski K. Location of heating installations in greenhouses for low temperature heating fluids [C]// Proceedings of CNRE Workshop, Dublin, Ireland, CNRE Bulletin No. 15, 1986:51~53.
- 19 Kempkes F L K, Van de Braak N J, Bakker J C. Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1):57~64.
- 20 王新坤,许文博,赵坤,等. 基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(1):82~86.
Wang Xinkun, Xu Wenbo, Zhao Kun, et al. Numerical simulation and design method of hot air for porous pipe based on CFD[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1):82~86. (in Chinese)
- 21 王新坤. 一种基于滴灌管网的温室冠层环境调控系统与方法: 中国, 201010603269.0[P]. 2011-08-17.
Wang Xinkun. A control system and method of greenhouse canopy environment based on drip irrigation pipe network: CN 201010603269.0[P]. 2011-08-17. (in Chinese)