

基于 CFD 模型的温室温度多指标 GA 优化控制*

李永博¹ 孙国祥¹ 楼恩平^{1,2} 汪小昆³ 丁为民³

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 浙江师范大学数理学院, 金华 321004;

3. 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: 建立了基于 CFD 模型的温室温度多指标优化闭环控制系统。采用 GA 优化算法, 在综合考虑温度平均值、温度均匀性和控制代价 3 项指标下, 通过循环迭代构建了温度系统的闭环形式, 获取了自然通风模式下的最佳控制量(入口和天窗开度), 使得系统在多指标条件下达到最优。仿真实验表明: 基于 CFD 模型的设计方法可将温室整体纳入控制系统之中, 区别于传统的“点”控制形式, 通过多指标体系的 GA 算法寻优, 可使温室作物的区域性生长差异和能量消耗减小, 提高温室控制精度, 丰富温室控制系统的设计方法。

关键词: 温室 温度 优化控制 计算流体力学 多指标 遗传算法

中图分类号: TP273; S625.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0186-06

Multi-index GA Optimal Control of Greenhouse Temperature Based on CFD Model

Li Yongbo¹ Sun Guoxiang¹ Lou Enping^{1,2} Wang Xiaochan³ Ding Weimin³

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. College of Mathematics and Physics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

3. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Closed-loop control system of greenhouse temperature was established for multi-index optimization by CFD modeling. In the system, multi-index including average temperature, temperature distributed and control cost, and control scene was natural ventilation. In order to minimize these indexes under the control mode, the GA optimization algorithm was adopted to obtain the optimal control outputs (entrances and skylights amplitudes). Simulation experiment shows that the technique of CFD for model can hold whole greenhouse environment into one system to improve control accuracy, and the control objective by CFD model is a “field”, not a “point” as tradition. Meanwhile, using GA algorithm can get the optimal control inputs in multi-index system for reducing regional difference and energy consumption synchronous, so this design technique can richen the technology in greenhouse control system.

Key words: Greenhouse Temperature Optimal control CFD Multi-index GA

引言

温室生产中, 关于温度因子的控制系统设计十分重要。早期以传递函数为模型^[1-5], 后来采用状态空间模型^[6-8], 目前则更多地使用高级智能算法

模型^[9-11], 实现时一般采用“点”反馈形式(温度或是反馈自一个传感器, 或是多个传感器求加权所得)。但是在实际温室生产中, 经常发现温室中作物生长存在局部差异, 这就说明用“点”反馈去表征整个温室的温度是不精确的, 需要选用能够反映温

收稿日期: 2012-09-05 修回日期: 2012-11-05

* 国家自然科学基金资助项目(60971106, 61273227)、南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ2011024)和江苏省农机局、南京农业大学工学院科研启动基金资助项目(reqd10-01)

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

室特征的模型来设计控制系统,以进一步提供控制精度。

近年出现的计算流体力学模型(Computational fluid dynamics, CFD)在温室环境模拟中得到广泛应用^[12-13],这种方法可获取温室温度因子“场”的空间分布,将“点”的反馈形式极大拓展。目前,利用 CFD 建立温室环境模型的方法已日趋完善,从早期的二维发展到三维^[14-15]、从自然升温到人工加热^[16]、从自然通风到机械通风^[17]等,最近又将作物纳入到研究范畴之内,研究温室各种工况下湿热环境的 CFD 模型构建与预测^[18-19],这些成果充分展示了 CFD 在温室环境模拟方面的优势,然而目前的研究结果重点是建立 CFD 模型并说明其有效,并未将这种模型和控制系统设计结合起来。

文献[20]虽然将 CFD 模型用于控制系统设计,但也是试验设计方法,属于开环,并不能获得最优的控制结果。本文目的是在文献[20]的基础上,将基于 CFD 模型的温室温度控制系统完善成闭环形式。具体而言,以 CFD 为技术手段建立三维温室温度模型,在控制指标选取上综合考虑温室中的温度场指标,提出温度平均值和均匀性评价指标,并结合控制代价指标,构成温室温度多指标体系,采用遗传算法(Genetic algorithm, GA)实现基于 CFD 模型的温室温度多目标优化闭环控制系统。

1 温室温度 CFD 模型

本文研究的温室位于南京农业大学校内,东经 118°46',北纬 32°03',为三脊 Venlo 型铝合金玻璃温室。4 间跨度共 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、喷雾系统和滴灌等系统,其中北侧天窗 2 组

(6 个)和南侧天窗 2 组(6 个)各由一个电动机驱动。具体物理结构如图 1 所示。

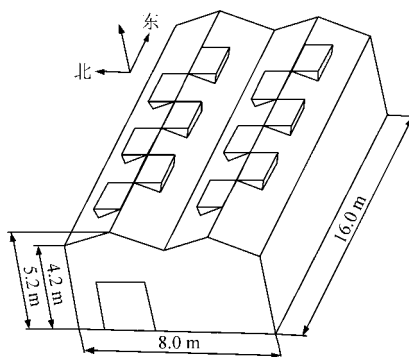


图 1 温室物理结构

Fig. 1 Physical structure of greenhouse

本文基于 CFD 模型的温室温度控制系统设计前提是一个合理有效的 CFD 模型,对于图 1 所示的温室,该模型可参见文献[21~23],其中包含连续方程、动量方程、能量方程、三维湍流方程、辐射方程和太阳加载模型。在模型建模时设定 x 轴为北方向, y 轴为东方向, z 轴向上,坐标原点取右下角。

计算域的划分,采用适应于不规则区域离散划分的非结构化、非均匀网格,在入口和出口附近流场变化梯度较大的区域进行局部网格加密处理。温室玻璃壁面、室内空气、测量的环境等初始参数和边界条件参见文献[20],其中地面为混凝土结构,在 CFD 模拟中设为绝热壁面,设置 1 个速度入口,12 个天窗压力出口,5 个玻璃壁面,1 个混凝土壁面(地面)。

2 多指标优化控制系统设计

2.1 控制原理

以自然通风模式为例,阐述基于 CFD 模型的温室温度 GA 控制原理及过程,总体框图如图 2 所示。

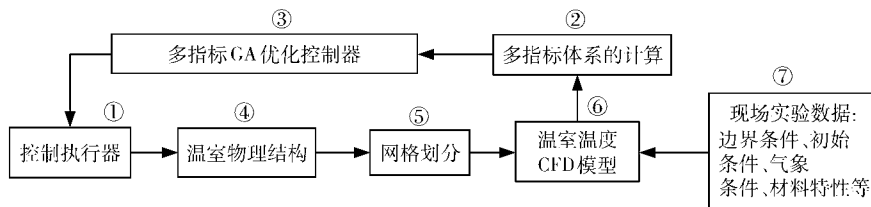


图 2 控制原理框图

Fig. 2 Diagram of control principle

图 2 是一个闭环系统,控制实现的基本过程为:系统初始化后,通过温室温度 CFD 模型的输出,获取多指标结果,反馈于 GA 优化控制器,调整自然通风下的执行器动作,从而又影响温室物理结构,在此基础上进行网格划分,又输入到温室温度 CFD 模型端,反复循环直至多指标达到极小。在自然通风中

涉及到的执行器分别为 3 个电动机,西侧入口大小、北侧天窗(6 个)和南侧天窗(6 个),在 CFD 模型中这 3 个量主要影响图 2 中的子单元(7),分别设定为速度入口、压力出口和压力出口。整个控制系统由图 2 中①~⑦共 7 个子单元组成,其中④~⑦是在温室 CFD 模拟中常见的部分,此处不再赘述,下文

着重介绍①~③部分的原理及其作用。

2.2 执行器模型

分析控制执行器并推导其模型。为计算方便统一进行标准化处理,将控制量化至0~100%之间。在图1的温室物理结构中,自然通风涉及到的执行装置是WJN-40型电动机,具体对应的控制执行器模型可表示如下:

(1) 入口模型

如图1所示,位于温室西侧(1个),全开时为2.4 m × 2.0 m,其中高度2.0 m不可调整,宽度2.4 m可调,经计算标准化模型为

$$u_1 = \frac{u_w}{2.4} \times 100\% \quad (1)$$

其中 $u_1 \in [0, 100\%]$ 为标准化后的入口控制量, $u_w \in [0, 2.4]$ 为入口宽度,即 $u_w = 0$ 时全闭, $u_w = 2.4$ 时全开, u_1 与 u_w 为线性关系。

(2) 北侧天窗模型

如图1所示,北侧天窗共6个,几何尺寸完全一致并联动,全开为23°,以其中任意1个为例,定义开度为 $\alpha_n \in [0, 23^\circ]$ 。假设出口处流体流动充分发展,考虑到天窗出口有3个面,经计算其标准化模型为

$$u_2 = \frac{2.25 \sin \alpha_n + 6 \sin(\alpha_n/2)}{2.25 \sin 23^\circ + 6 \sin(23^\circ/2)} \times 100\% \quad (2)$$

其中 $u_2 \in [0, 100\%]$ 为标准化后的北侧天窗控制量, $\alpha_n = 23$ 时全开, $\alpha_n = 0$ 时全关,可以看出 u_2 与 α_n 为非线性关系,为简化计算对式(2)在定义域内进行数值计算,得到 u_2 与 α_n 关系,可以看出 u_2 与 α_n 线性度较高,用最小二乘法拟合后有

$$u_2 \approx 4.35\alpha_n + 0.31 \quad (3)$$

其中式(3)与式(2)在定义域内最大非线性误差仅为0.46%,可认为用式(3)代替式(2)是可以保证精度的,因此后面的计算采用式(3)作为北侧天窗模型。

(3) 南侧天窗模型

南侧天窗与北侧天窗在物理结构上完全一致,不同之处仅在于天窗开启的方向,类似于北天窗可用线性模型表示为

$$u_3 \approx 4.35\alpha_s - 0.31 \quad (4)$$

其中 $u_3 \in [0, 100\%]$ 为标准化的南侧天窗控制量, $\alpha_s \in [-23^\circ, 0]$ 为南侧天窗开度。

2.3 多指标体系设计

多指标设计是指在控制系统设计中不以单一指标为目的,综合多方面因素制定控制策略的方法,其思路符合重点突出、统筹全局的实际系统设计要求,本文提出的温室温度控制多指标体系包括温度指标

和控制代价指标。

2.3.1 温度指标

温室中温度指标不仅应该能表征整个空间的温度状态,而且为了全体作物都生长在合理温度范围内,还要能表征温度在不同区域的差异,因此温度指标选用以下两个。

(1) 温度平均值指标

$$J_1 = \sum_{j=1}^m \alpha_j (\bar{T}_z - T_z^*) \quad (5)$$

式中 J_1 ——温度平均值指标

\bar{T}_z ——高度为 z 的平面平均温度

T_z^* ——高度为 z 的平面温度设定值

m ——选取的温度层数

α_j ——第 j 层温度平均值的权重,表征该层温度对作物生长的重要性

(2) 温度均匀性指标

均匀性指标为体现温室中同一平面不同区域的温度差异,用该层温度点集合的标准差加以描述

$$J_2 = \sum_{k=1}^l \beta_k \frac{\sqrt{\iint (T - \bar{T}_z)^2 dx dy}}{A_z} \quad (6)$$

式中 J_2 ——温度均匀性指标,表征该层温度分布的区域性差异

T ——该高度平面层中的任意点温度

A_z ——该高度的温室层面积

l ——选取的温度层数

β_k ——第 k 层指标在总均匀性指标 J_2 中的权重

2.3.2 控制代价指标

图1所示的温室中用于自然通风的执行器均为电动机,不同开度意味着耗电量的大小,而实际温室生产一般常年工作,因此耗能也必须考虑,为了评价耗能提出控制代价指标为

$$J_3 = \sum_{r=1}^3 \gamma_r u_r \quad (7)$$

式中 J_3 ——控制代价指标

γ_r ——第 r 个执行器耗能比重

u_r ——第 r 个执行器标准化控制量

2.4 GA 优化控制算法

经过前面分析,最终基于GA的控制算法可描述为多指标优化问题

$$\begin{cases} \min & J = f(J_1, J_2, J_3) \\ \text{s. t.} & \bar{T}_z \in [\bar{T}_z - \Delta\bar{T}_z, \bar{T}_z + \Delta\bar{T}_z] \\ & (z \in [0, 5.2]; u_r \in [0, 100]; r = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\Delta\bar{T}_z > 0$ 表示高度为 z 的平面温度最大偏差设定值, J 为算法设计中引入总体指标。为了表述方

使用 $(J_1 + J_2)$ 代表温度指标, J_3 代表控制代价指标, 取总体指标为

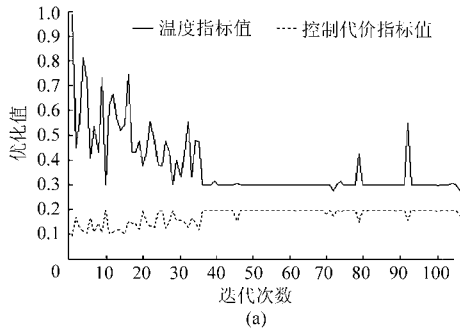
$$J = P(J_1 + J_2) + QJ_3 \quad (9)$$

其中 P, Q 为温度指标和控制代价指标的权重系数, 这两个系数一方面用于两个重要性的权衡, 另一方面在 GA 算法中作收敛判断使用。

3 实验

以图 1 的实验温室为对象, 建立温室温度 CFD 模型, 选取 $m = l = 3$ 且 $j = k$, 即考虑 3 个平面作为平均值和均匀性的评价温度层, 具体高度 z 取 0.2 m、1.0 m 和 2.0 m, 分别表征地面层、中间层和冠层, 相关设定值和权重系数如表 1 所示。

在表 1 中, 各种权重系数选择需要根据作物生长需求加以确定, 比如地面层、中间层和冠层对温度要求是不一致的, 此值对于不同作物可从其生长对温度的需求表中查到, 此处仅作原理研究, 温度平均值指标 α_j 和均匀性指标 β_k 均取表中的值; 由于自然通风时的执行器都是 WJN-40 型电动机, 功率一致, 因此控制量指标 γ_r 选取也相同。



参数	数值	
温度参数	平均温度 $\{\bar{T}_z\}/K$	{294.20, 294.50, 294.65}
	温度偏差 $\{\Delta T_z\}/K$	{0.10, 0.10, 0.05}
权重系数	平均值指标 $\{\alpha_j\}$	{0.60, 0.60, 0.30}
	均匀性指标 $\{\beta_k\}$	{0.40, 0.40, 0.20}
	控制量指标 $\{\gamma_r\}$	{1/3, 1/3, 1/3}
	整体指标 (P, Q)	(0.65, 0.35)

在 GA 算法设计中取基因长度为 20, 种群数为 10, 繁殖 20 代, 交叉率为 0.5, 变异率为 0.01, 初始 u_r 从 {100, 100, 100} 开始, 对应的温度指标为 0.967, 控制代价指标为 0.096, 总体指标为 1.083。以 2.4 节为多指标体系通过 105 次迭代优化, 最后得到的优化控制量为 $\{u_r\} = \{7.45, 21.92, 82.12\}$ 。对应的温度指标为 0.276, 控制代价指标为 0.173, 总体指标为 0.449。有效优化过程中温度指标、控制代价指标和总体指标变化如图 3 所示。

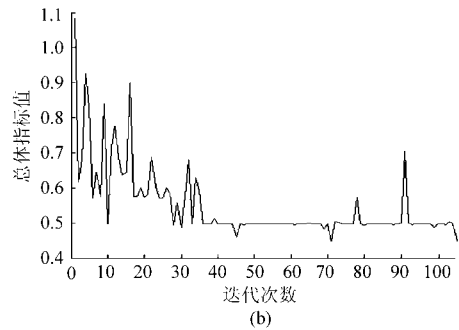


图 3 迭代过程中的指标变化

Fig. 3 Trend of indexes in iterative course

(a) 温度和控制代价指标 (b) 总体指标

从图 3a 可以看出优化过程中控制代价指标变化不是很明显, 但是温度指标减小较大, 表明在本实验模拟中, 对温度控制的要求大于对控制代价的要求, 这从表 1 中 P, Q 的值也能得到体现; 而图 3b 中的总体指标在整个优化过程中基本上保持下降趋势, 偶尔增大是变异操作为了获取全局最优所作的数值探索, 以保证寻优的全局性。

整个温室温度经过多目标优化控制后, 对应的 3 层流体温度分布如图 4 所示。选择温度范围在 294.0 ~ 294.5 K 之间绘制等温线, 图 4a 中 294.4 K 等温线范围较大, 其次是 294.2 K, 最后是 294.6 K; 图 4b、4c 中 294.6 K 等温线范围最大, 其次是 294.4 K, 其他等温线覆盖面积较小, 这表明随着高度增大温度逐渐升高, 符合实际情况; 从温度分布的均匀性上看, 图 4a 比图 4b、4c 明显要差, 说明层高越大温度

局部差异越小。

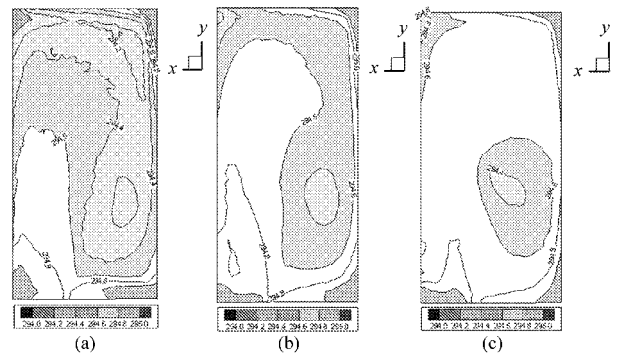


图 4 不同高度层温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of different layers

(a) 高度为 0.2 m (b) 高度为 1.0 m (c) 高度为 2.0 m

对应 3 层温度平均值和标准差变化如图 5 所示。

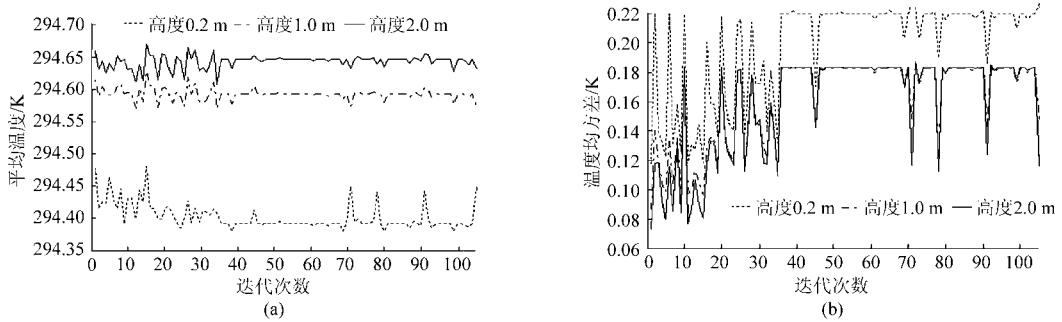


图5 优化过程中的温度变化曲线

Fig.5 Temperature trend of indexes in iterative course

(a) 平均温度 (b) 温度均方差

从图5a中可以明显看出温室温度的分层特性,而且105次有效优化均满足式(8)的温度指标约束;而图5b标准差变化则不同,在满足控制要求的前提下,整体上看高度为0.2m时温度标准差最大,表明在地面层温度的分布存在的差异大于中间层和冠层,实际控制系统设计时需加以考虑,减小该差异以提高温度均匀性。

4 结论

(1) CFD模型用于温室温度控制系统的设计是合理有效的,这种方法可将目前基于“点”反馈形式拓展到“场”,更好地适应温室作物生长的需求,在实验结果中可以看出:地面层、中间层和冠层的平

均温度分别在294.20、294.50、294.65K设定值附近,满足控制的设定值要求。

(2) 实验研究中采用多指标体系与GA优化算法可以将总体指标从1.083降低到0.449,幅度达50%左右,使得控制代价和温度指标均减小,挖掘了现有温室控制系统的潜力。

(3) 提出的温室控制方法耗时主要在CFD模型求解,因此一个高效的CFD模型十分关键,考虑到目前温室控制系统结构多基于主/从机设计,可将本文的控制系统嵌入性能较强的主机之中,充分利用其计算能力强、多核并行运算等优点减小优化时间,从机只负责数据采集与输出即可。

参 考 文 献

- Nielsen B, Madsen H. Identification of transfer functions for control of greenhouse air temperature[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 60(1): 25~34.
- Chalabi Z S, Bailey B J, Wilkinson D J. A real-time optimal control algorithm for greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1996, 15(1): 1~13.
- Cunha J B, Couto C, Ruano A E. Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(10): 1473~1481.
- 林东亮,沈恩德,张侃谕,等.玻璃温室地热加热系统模型与控制[J].农业机械学报,2009,40(2):151~154,219.
Lin Dongliang, Sheng Ende, Zhang Kanyu, et al. Greenhouse control using geothermal water heating system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 151~154, 219. (in Chinese)
- 屈毅,宁铎,赖展翅,等.温室温度控制系统的神经网络PID控制[J].农业工程学报,2011,27(2):307~311.
Qu Yi, Ning Duo, Lai Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 307~311. (in Chinese)
- Tawegoum R, Teixeira R, Chasseriaux G. Simulation of humidity control and greenhouse temperature tracking in a growth chamber using a passive air conditioning unit[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(8): 853~861.
- Bennis N, Duplaix J, Enea G, et al. Greenhouse climate modeling and robust control[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 96~107.
- 王子洋,秦琳琳,吴刚,等.基于切换控制的温室温湿度控制系统建模与预测控制[J].农业工程学报,2008,24(7):188~192.
Wang Ziyang, Qin Linlin, Wu Gang, et al. Modeling of greenhouse temperature-humid system and model predictive control based on switching system control[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 188~192. (in Chinese)
- 王纪章,李萍萍,毛罕平.基于作物生长和控制成本的温室气候控制决策支持系统[J].农业工程学报,2006,22(9):168~171.
Wang Jizhang, Li Pingping, Mao Hanping. Decision support system for greenhouse environment management based on crop growth and control cost[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 168~171. (in Chinese)
- Korner O, Van Straten G. Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies[J]. Computers and Electronics in

- Agriculture, 2008, 60(1): 18 ~ 30.
- 11 Gruber J K, Guzman J L, Rodriguez F, et al. Nonlinear MPC based on a Volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(4): 354 ~ 366.
- 12 Wang Rui, Xu Hui, Ma Jian, et al. CFD analysis of airflow distribution in greenhouse with pad and fan cooling system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 250 ~ 255.
- 13 Fidaros D K, Baxevanou C A, Bartzanas T, et al. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day[J]. Renewable Energy, 2010, 35(7): 1 380 ~ 1 386.
- 14 王健,汪小昂,丁为民,等. 风压通风的单栋温室内部流场的 ANSYS CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 114 ~ 116, 121.
Wang Jian, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. ANSYS CFD simulation of air flow distribution in a tunnel greenhouse under wind driven situation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 114 ~ 116, 121. (in Chinese)
- 15 沈明卫,郝飞麟. 内遮阳网对连栋温室内自然通风流场影响的稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 120 ~ 124.
Shen Mingwei, Hao Feilin. Steady simulation of the effect of inner solar-shading screen on airflow distribution inside multi-span plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 120 ~ 124. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 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)
- 18 程秀花,毛罕平,伍德林,等. 自然通风玻璃温室热环境时空分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 179 ~ 183.
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. Numerical simulation of thermal profiles in spatial and temporal field for natural ventilated glasshouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 179 ~ 183. (in Chinese)
- 19 程秀花,毛罕平,倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建及预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 173 ~ 179, 157.
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, 157. (in Chinese)
- 20 李永博,周伟,李鹏飞,等. 基于 CFD 模拟模型的温室温度场均匀性控制[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 156 ~ 161.
Li Yongbo, Zhou Wei, Li Pengfei, et al. Temperature distribution control of greenhouse based on CFD simulation model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 156 ~ 161. (in Chinese)
- 21 Fluent Inc. FLUENT 6.3 documentation[M]. Fluent Inc., 2006.
- 22 Li Yongbo, Li Pengfei, Wang Xiaochan. The randomness of the wind and its impact on greenhouse CFD simulation[C] // Proceedings of the 2nd International Conference on Electric Information and Control Engineering, 2012: 2 361 ~ 2 364.
- 23 Li Yongbo, Lou Enping, Wang Xiaochan. Greenhouse temperature model analysis based on CFD technology[C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2012: 862 ~ 865.

(上接第 196 页)

- 6 刘龙申,沈明霞,孙玉文,等. 基于 FPGA 的农田图像采集与 3G 无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 186 ~ 190.
Liu Longshen, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Acquisition system and wireless transmission by 3G for farmland image based on FPGA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 186 ~ 190. (in Chinese)
- 7 King G J, Willoughby R A, Hacker R R. Fluctuations in rectal temperature of swine at parturition[J]. Canadian Veterinary Journal, 1972, 13(1): 72 ~ 74.
- 8 Elmore R G, Martin C E, Riley J L, et al. Body temperatures of farrowing swine[J]. Journal of the American Veterinary Medical Association, 1979, 174(4): 620 ~ 622.
- 9 Hendrix W F, Kelley K W, Gaskins C T, et al. Changes in respiratory rate and rectal temperature of swine near parturition[J]. Journal of Animal Science, 1978, 47(1): 188 ~ 191.
- 10 Hartsock T G, Barczewski R A. Prepartum behaviour in swine: effects of pen size[J]. Journal of Animal Science, 1997, 75(11): 2 899 ~ 2 903.
- 11 Bradshaw R H, Broom D M. A comparison of the behaviour and performance of sows and piglets in crates and oval pens[J]. Animal Science, 1999, 69(2): 327 ~ 333.
- 12 J P Marques de Sa. 模式识别:原理、方法及应用[M]. 吴逸飞,译. 北京:清华大学出版社,2002.