

# 基于 CFD 非稳态模型的温室温度预测控制\*

周伟<sup>1,2</sup> 李永博<sup>1</sup> 汪小岳<sup>1</sup>

(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 Venlo 温室内温度场为研究对象, 提出了一种基于计算流体动力学(CFD)非稳态模拟模型的预测控制方法。CFD 模型作为虚拟温室环境, 将其非稳态模拟产生的时间序列数据代替真实的物理试验数据, 结合系统辨识理论将 CFD 模型转换成基于数据的系统控制模型, 实现基于 CFD 的温室温度预测控制。仿真结果表明, 基于 CFD 的预测控制实现温室温度控制的平均偏差为 2.65℃, 标准偏差为 3.27℃, 可将室内温度平稳有效地控制在作物生长允许的温度范围内。系统辨识、控制算法和 CFD 技术的结合, 提高了控制器设计的效率, 丰富了温室控制系统的设计方法。

**关键词:** 温室 建模 CFD 系统辨识 模型预测控制

**中图分类号:** S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0335-06

## 引言

温室温度控制是涉及流动、传热等物理现象的控制系统, 该类系统建模存在参数众多、物理测量代价高且周期长、建模过程依赖试验获取大量试验数据等问题, 因而其控制器设计往往耗时费力<sup>[1]</sup>。基于计算流体动力学(CFD)的建模方法, 在分析温室传热传质机理的基础上对温室内环境进行模拟预测研究, 其模拟结果已被证明具有良好的吻合性<sup>[2-7]</sup>。对于已验证的有效的 CFD 模型, 一次数值模拟相当于实现了一次物理测量<sup>[8]</sup>, 其最大的优点是可通过快速地改变和重组输入条件, 获取温室结构特征、外界的气象条件以及作物生长等参数对温室内部小气候环境的影响。对于涉及非稳态、非线性过程的温室流体流动及热传导过程的温室温度控制, 采用基于 CFD 的方法更易获得有价值的信息, 若能将模拟产生的详尽的流场数据插入到温室的控制系统中, 用于控制系统建模和控制器设计, 不仅可以提高研究效率, 减少成本, 而且对温室环境控制系统设计提供了一种新的实现思路。

目前将 CFD 模型用于温室控制系统设计的研究较少, 李永博<sup>[9-10]</sup>等提出了基于 CFD 稳态模拟模型的温室温度场均匀性控制和多指标 GA 优化控制方法, 两种方式均以 CFD 稳态模型的输出作为优化控制系统的输入, 通过反复循环执行 CFD 数值计算

获得温室控制动作的最优值。由于受数值计算的时间和复杂程度限制, 以及稳态模型的非时变特性, CFD 模型不适合用在以在线控制为目标的温室控制系统中。

本文针对具体试验温室的控制目标, 以温室内温度为被控对象, 通过 CFD 非稳态数值计算获取连续时间域内反映被控系统外部特征的输入/输出数据; 考虑到 CFD 模拟的耗时性和复杂性, 利用系统辨识技术把 CFD 模型转换成基于数据的温室温度预测模型, 实现基于 CFD 的温室温度预测控制, 最后通过仿真试验求取温度设定值下的最优控制结果。

## 1 温室温度预测模型

### 1.1 温室温度 CFD 非稳态模拟模型

本文研究的温室位于南京农业大学工学院, 东经 118°46', 北纬 32°03', 为双脊 Venlo 型铝合金玻璃温室, 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, 通风天窗位于屋脊两侧, 天窗尺寸为长 2.0 m × 宽 0.85 m, 屋顶通风面积为 20.4 m<sup>2</sup>, 其中北侧天窗 2 组(6 个)和南侧天窗 2 组(6 个)联动, 最大开度 21°, 无侧窗。具体物理结构如图 1 所示。

基于 CFD 非稳态模型的温室温度预测控制前

收稿日期: 2014-07-06 修回日期: 2014-09-02

\* 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: 汪小岳, 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

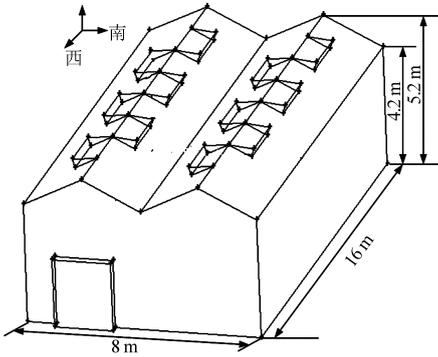


图1 温室物理结构

Fig. 1 Physical structure of greenhouse

提是一个合理有效的 CFD 非稳态模型,对于图 1 所示的温室,该模型可参照文献[11-14]。室内空气流动过程遵循基于雷诺时均的质量、动量和能量守恒方程,选择标准  $k-\varepsilon$  湍流模型进行 CFD 模拟计算,近壁区的流体运动采用标准壁面函数法。太阳辐射对温室环境的影响根据室外气候条件采用基于 DO 辐射模型的 solar ray tracing 方法。由热压(温差)引起的自然通风流体运动通过 Boussinesq 假设加入到动量守恒方程的源项。建模时  $x$  轴为南方向, $z$  轴为西方向, $y$  指向天空,坐标原点在左上角。

计算域包括温室室内区域和室外区域(长 160 m × 宽 80 m × 高 50 m) 2 个部分,作物设置为长 14 m × 宽 0.5 m × 高 1.6 m 的六面体结构 5 行,间距 1 m。边界条件、初始条件和求解方法参照文献[14]。为了将 CFD 非稳态模拟产生的输入输出数据用于系统辨识,计算过程中将室内温度以 5 min 作为存储周期实时自动保存,并生成文本文件,供后续的系统辨识调用。

## 1.2 基于 CFD 的温室温度预测模型

以 CFD 非稳态数值模拟试验代替温室温度系统开环试验,边界条件、初始条件和气象条件等作为系统输入,模拟结果作为系统输出,利用系统辨识技术将 CFD 模型转换成基于输入输出数据的温室温度预测模型。

温室温度系统是一个非线性、强耦合、大时滞、强干扰的非线性复杂系统,但室内外环境的变化范围在一段时间内是有限的,可以在局域用线性模型拟合系统动力学特性<sup>[15]</sup>。温室内环境是室外气候条件和温室调控共同作用的结果,采用相关性分析技术<sup>[16]</sup>,以室外温度、湿度、太阳辐射和风速作为模型的扰动输入,天窗的开度作为可控输入,室内温度为输出,可用 ARMAX 模型近似温室温度系统的特性

$$A(q^{-1})y(k) = \sum_{i=1}^5 B_i(q^{-1})u_i(k - n_{d_i}) + C(q^{-1})\varepsilon(k) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad A(q^{-1}) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i q^{-i} \\ B_i(q^{-1}) &= \sum_{j=1}^{n_{b_i}} b_{ij} q^{-j} \\ C(q^{-1}) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i q^{-i} \end{aligned}$$

式中  $y(k)$ —— $k$  时刻温室内温度,℃

$u_i(k)$ —— $k$  时刻第  $i$  个输入, $i=1,2,\dots,5$

$u_1, u_2, u_3, u_4, u_5$ ——室外温度、室外相对湿度、室外太阳辐射、室外风速和天窗开度

$n_a, n_{b_i}, n_c$ ——多项式  $A(q^{-1}), B_i(q^{-1}), C(q^{-1})$  的阶数

$n_{d_i}$ ——系统纯滞后

$a_i, b_{ij}, c_i$ ——多项式  $A(q^{-1}), B_i(q^{-1}), C(q^{-1})$  的系数

$\varepsilon(k)$ ——零均值、方差相同且有界、不相关、平稳随机变量序列

对 CFD 非稳态模拟产生的输入/输出数据进行归一化处理(滤波,去趋势项等),将其分为辨识集数据和证实集数据。对于式(1)描述的温室温度模型,系统辨识包括模型结构辨识和参数识别,模型结构即式(1)中多项式阶数的确定,采用累试法,首先确定  $n_a, n_{b_i}, n_c$  和  $n_{d_i}$  的大致取值范围,以  $n_a, n_{b_i}, n_c$  和  $n_{d_i}$  的不同取值组合构成备选模型集,用辨识集数据采用带遗忘因子的递推最小二乘法确定式(1)中多项式的系数即模型参数<sup>[17]</sup>,然后用证实集数据计算模型损失函数,从中选择损失函数最小的即为辨识所得的 ARMAX 模型,称为 CFD-ARMAX 模型。损失函数定义为预测误差的平方和,即

$$l = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L e_i^2 \quad (2)$$

式中  $L$ ——证实集的数据长度

$e_i$ ——证实集中第  $i$  个数据的实测值与预测值之差

系统辨识得到的模型需要进行验证,和传统的系统辨识不同的是,基于 CFD 的系统辨识其输入输出数据不是来自实际物理试验,而是来自 CFD 数值计算,因此把 CFD-ARMAX 模型输出分别与 CFD 模拟输出、温室温度实测值进行比较,同时检验 CFD-ARMAX 模型的预测输出拟合系统实际输出的精度,以确定辨识所得模型是否能够反映系统的实际规律,以及是否满足实际应用的预测精度要求。采用的评价指标有标准误差(Root mean squared error, RMSE)、最大绝对误差(Max absolute error, MAE)、平均误差(Mean error, ME)和模型拟合度  $F$ 。

## 2 基于 CFD 模型的温室温度预测控制

由于边界条件的不准确性以及计算模型的简化,CFD 模型本身存在的误差将导致 CFD-ARMAX 模型的精度下降;另外辨识过程中模型结构选择不当、数据代表性太差、辨识算法存在问题等也会直接影响模型精度。模型预测控制 MBPC(Model based predictive control)对系统模型精度要求低,可以克服系统模型失配、外界干扰等不确定因素对系统稳定性的影响<sup>[18]</sup>。在温室温度控制中,采用预测控制不仅能计算当前的天窗控制状态和温室内部的温度,而且能够预测未来时刻的温度,从而根据设定值确定当前时刻的控制量,使系统提前动作,有效克服时延带来的系统动态品质差等问题,并且其特有的滚动时域控制策略,可以直接处理系统的输入输出约束<sup>[19]</sup>。

基于 CFD 的温室温度 MBPC 控制原理如图 2 所示,以 CFD-ARMAX 模型为预测模型,MBPC 本身是一种优化控制算法,通过使目标函数达到最优来确定天窗动作的优化控制规则,使预测输出尽可能地达到期望输出,从而最小化未来的控制误差。

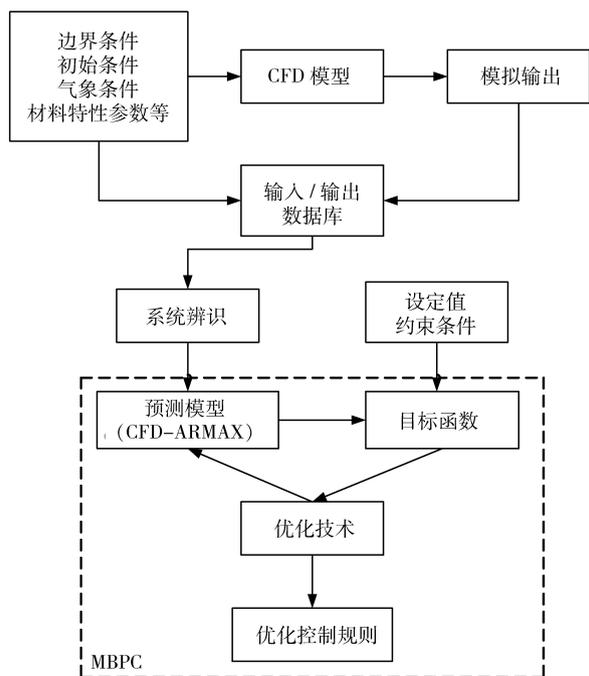


图 2 基于 CFD 的模型预测控制原理

Fig. 2 Schematic of model predictive control based on CFD

由式(1)确定的系统最小方差输出预测模型为<sup>[20]</sup>

$$\hat{y} = G\Delta u + y_0 \quad (2)$$

其中

$$\hat{y} = [\hat{y}(k+1|k) \quad \hat{y}(k+2|k) \quad \cdots \quad \hat{y}(k+N_p|k)]^T$$

$$\Delta u = [\Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \cdots \quad \Delta u(k+N_p-1)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N_p} & g_{N_p-1} & g_{N_p-2} & \cdots & g \end{bmatrix}$$

$$y_0 = \begin{bmatrix} \hat{y}_0(k+1|k) \\ \hat{y}_0(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_0(k+N_p|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} e(k+1)$$

式中  $\Delta u$ ——系统控制输入(天窗开度)增量

$g_i$ ——系统单位阶跃响应系数的前  $N_p$  项

$y_0$ ——由式(1)确定的系统开环预测输出

为了考虑现在时刻天窗的状态对将来时刻室内温度的影响,使室内温度在未来的采样点上跟踪某一期望轨迹的方差,并以最优方式趋于设定值,目标函数通常采用预测输出和参考轨迹误差的二次函数形式,即

$$J(k) = \lambda_1 \sum_{j=1}^{N_p} (\hat{y}(k+j|k) - y_r(k+j))^2 + \lambda_2 \sum_{j=0}^{N_c-1} (\Delta u(k+j))^2 \quad (3)$$

其中

$$\Delta u(k+j) = \begin{cases} u(k) - u(k-1) & (j=0) \\ u(k+j) - u(k+j-1) & (j=1, 2, \dots, N_c-1) \end{cases}$$

式中  $\hat{y}(k+j|k)$ —— $k$  时刻对  $k+j$  时刻的输出预测

$y_r(k+j)$ ——参考轨迹

$\lambda_1$ ——输出误差加权系数

$\lambda_2$ ——控制加权系数

$N_p$ ——预测时域长度

$N_c$ ——控制时域长度,  $N_p > N_c$

$\Delta u(k+j)$ —— $k$  时刻计算出的未来  $j$  步控制输入增量

目标函数的后一项主要是压制过于剧烈的控制增量,以防止系统发生剧烈震荡。

为了防止控制输入天窗动作幅度过大,通常给定参考轨迹

$$\begin{cases} y_r(k) = y(k) \\ y_r(k+j) = \alpha y_r(k+j-1) + (1-\alpha)r(k+j) \quad (0 < \alpha < 1) \end{cases}$$

式中  $\alpha$ ——输出柔化系数,取 0.4

$r(k+j)$ ——实际温度设定值

使输出平稳准确的跟踪设定值。

考虑天窗开度的约束,MBPC 控制律的求取转换为

$$\min_{u(k|k), \dots, u(k+N_c-1|k)} J(k)$$

$$s. t. \quad 0 \leq u(k+j|k) \leq 1, j=0, \dots, N_c-1 \quad (4)$$

令  $y_r = [y_r(k+1), y_r(k+2), \dots, y_r(k+N_p)]^T$ , 则目标函数(3)可表示成

$$J = \lambda_1 (y - y_r)^T (y - y_r) + \lambda_2 \Delta u^T \Delta u \quad (5)$$

将  $y = \hat{y}$  代入目标函数, 令  $\partial J / \partial \Delta u = 0$ , 可得最优控制律为

$$\Delta u = (G^T G + \lambda_2 I)^{-1} G^T \lambda_1 (y_r - y_0) \quad (6)$$

实际控制时, 每次仅将  $\Delta u$  中第 1 个分量加入系统进行滚动优化。

### 3 结果与分析

研究的温室 CFD 非稳态模拟模型已经在试验中得到验证, 具体技术方法参照文献[14], 此处重点讨论 CFD-ARMAX 模型的有效性。以 2011 年 11 月 25 日的数据为辨识集, 26 日的数据为证实集, 图 3 为 25 日和 26 日的室外气候参数。对于式(1)的模型,  $n_a = 5$  足以描述温室温度系统特性、 $n_{bi}$  的阶次不超过 3 阶<sup>[21]</sup>。取  $n_a$ 、 $n_{d_i}$  和  $n_c$  上限为 5,  $n_{b_i}$  的上限为 3, 构成备选模型结构, 用辨识集数据采用带遗忘因子的递推最小二乘法确定模型参数, 再用证实集数据计算损失函数, 选择损失函数最小的即为最优的模型结构。

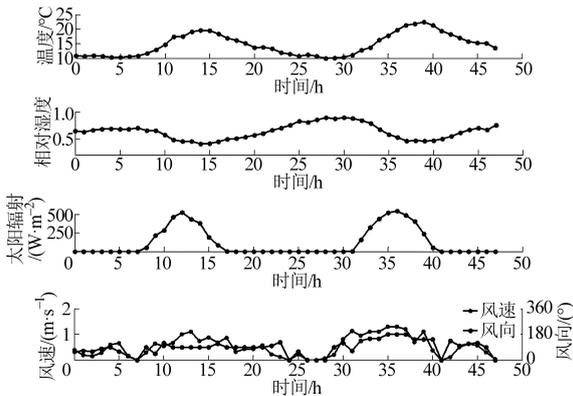


图 3 室外气象参数

Fig. 3 External climatic parameter

表 1 为系统辨识获得的 CFD-ARMAX 模型输出分别与 CFD 模拟输出、温室温度实测值比较的误差统计分析。由表 1 可知, CFD-ARMAX 模型输出与 CFD 模拟输出和实测值的 RMSE 分别为 0.439 3℃ 和 0.588 8℃, 误差较小, 说明建立的模型有较高的辨识精度, 能够反映温室温度的实际规律。由于实际的温室环境控制中, 天窗动作的切换均需要一定的时间, 因而多步预测温室内温度才有意义, 由图 4 可知, 辨识所得的 CFD-ARMAX 模型能够较好地符合温室温度的动态特性, 其 5 步预测输出(即预测 25 min 后温室内温度)和实测值的拟合度为

95.03%, 可以满足预测精度的要求。

表 1 CFD-ARMAX 模型误差统计分析

Tab. 1 Error statistic analysis of CFD-ARMAX model

误差	ME/℃	MAE/℃	RMSE/℃
CFD 模拟值	0.412 1	1.102 9	0.439 3
实测值	0.483 7	1.466 6	0.588 8

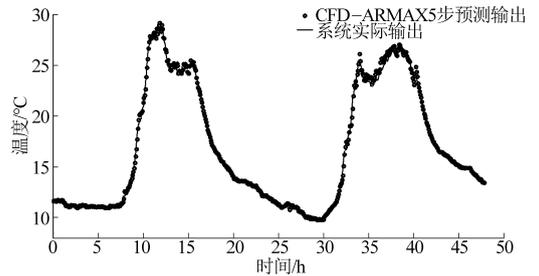


图 4 验证模型预测输出曲线

Fig. 4 Validation of predictive output

以 CFD-ARMAX 模型为预测模型, 室外气候参数采用 26 日 24 h 实际测量数据(图 3), 图 5 为 MBPC 控制效果仿真曲线以及计算的天窗开度, 用 0~1 表示天窗开度, 全开为 1。对于黄瓜作物, 秋冬季节白天适宜温度为 [25℃, 30℃], 夜间为 [13℃, 16℃], 作物生长允许的温度为 [8℃, 30℃], 给定夜间温度设定值为 14℃, 日间为 27℃。从图 5 可以看出, 由于天窗开度的物理限制, 夜间(0:00~8:00, 室外温度为 9.8~12.2℃)天窗全闭和白天(11:40~15:08, 室外温度为 19.4~23℃)天窗全开状态下的室内温度和设定值的平均控制误差分别为 1.83℃ 和 1.67℃, 最大控制误差分别为 2.56℃ 和 3.03℃; 当系统设定值在白天和夜间之间切换时, 天窗分多次缓慢开启(关闭), 保证了温室温度的平稳变化。当室外温度在 [9.8℃, 23℃] 的区间内变化时, MBPC 控制天窗动作实现温度控制的标准偏差为 3.27℃, 平均偏差为 2.65℃, 可将室内温度控制在 10.97~28.8℃ 的区间内, 全天 57.5% 的时间里室内温度在作物适宜的温度区间内。因而仅靠天窗开度调控的方式不能完全保证室内作物生长在适宜的温度下, 但仍在作物生长允许的温度范围内, 可较好地保全植株, 不会对作物生长产生危害。

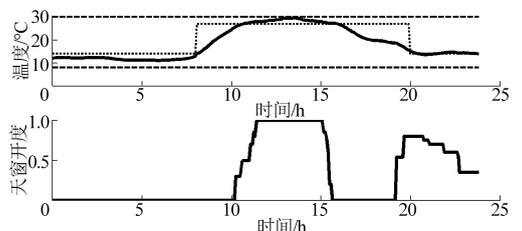


图 5 MBPC 控制仿真曲线

Fig. 5 Control simulation of MBPC controller

## 4 结论

(1) 从温室 CFD 非稳态模型出发, 采用系统辨识技术, 将 CFD 模拟产生的数据插入到温室温度控制系统设计中。通过仿真试验表明, 该方法产生的 CFD - ARMAX 模型输出和实测值的 RMSE 为  $0.5888^{\circ}\text{C}$ , 该辨识模型具有较高的预测精度, 能够反映温室温度的实际规律。

(2) 基于 CFD 模型的 MBPC 控制算法实现温室温度控制, 产生较大的控制误差的原因是预测模

型中仅显含一个控制输入, 受温室天窗开度的物理限制, 室内温度的控制范围也是有限的。同时, 作为干扰输入的室外气候条件的变化, 也影响了控制精度。

(3) 对于已验证的温室环境 CFD 模型, CFD 模拟可以认为是针对温室系统各部分之间的对流换热、热传导和辐射换热过程进行的“虚拟”试验, 提供系统模型辨识所需的“软测量”数据, 系统辨识、控制算法和 CFD 模型的结合减少了建模成本, 提高了控制器的设计效率。

## 参 考 文 献

- 李晋, 秦琳琳, 岳大志, 等. 试验温室温度系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1869 - 1875.  
Li Jin, Qin Linlin, Yue Dazhi, et al. Experiment greenhouse temperature system modeling and simulation [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1869 - 1875. (in Chinese)
- 沈明卫, 郝飞麟. 自然通风下栽培番茄的单栋温室内气流场稳态模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 101 - 105.  
Shen Mingwei, Hao Feilin. Steady state numerical simulation of airflow pattern in natural ventilated tunnel greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 101 - 105. (in Chinese)
- 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 玻璃温室自然通风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)
- 张起勋, 于海业, 张忠元, 等. 利用 CFD 模型研究日光温室内的空气流动[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 166 - 171.  
Zhang Qixun, Yu Haiye, Zhang Zhongyuan, et al. Airflow simulation in solar greenhouse using CFD model [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 166 - 171. (in Chinese)
- 吴飞青, 胥芳, 张立彬, 等. 基于多孔介质的玻璃温室加热环境数值模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 180 - 185.  
Wu Feiqing, Xu Fang, Zhang Libin, et al. Numerical simulation on thermal environment of heated glass greenhouse based on porous medium [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 180 - 185. (in Chinese)
- 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)
- 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)
- Khalafvand S S, Ng E Y K, Zhong L. CFD simulation of flow through heart: a perspective review [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2011, 14(1): 113 - 132.
- 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 homogeneity control of greenhouse based on CFD simulation model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 156 - 161. (in Chinese)
- 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 186 - 191. (in Chinese)
- 周伟, 汪小昆. 南方梅雨季节下 Venlo 型温室小气候数值模拟研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(9): 190 - 193.  
Zhou Wei, Wang Xiaochan. Venlo-type greenhouse microclimate simulation research in the plum rainy wather of south China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9): 190 - 193. (in Chinese)
- Fluent Inc. FLUENT 6.3 documentation [M]. Lebanon NH: Fluent Inc., 2006.
- 王启杰. 对流传热传质分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- 周伟, 汪小昆, 李永博. 可变边界条件下的 Venlo 温室温度场非稳态模拟[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 304 - 310. (in Chinese)
- 李晋, 秦琳琳, 吴刚, 等. 现代温室温度系统在线建模[J]. 信息与控制, 2008, 37(4): 500 - 508.  
Li Jin, Qin Linlin, Wu Gang, et al. On-line modeling of modern greenhouse temperature system [J]. Information and Control, 2008, 37(4): 500 - 508. (in Chinese)

- 16 张晓华. 系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 48 - 49.
- 17 Uchida Frausto H, Pieters J G, Deltour J M. Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models [J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(2): 147 - 157.
- 18 梁军, 杜丽. 自适应控制系统鲁棒性研究评述[J]. 信息与控制, 1998, 27(3): 197 - 205.  
Liang Jun, Du Li. A survey on robustness of adaptive control systems [J]. Information and Control, 1998, 27(3): 197 - 205. (in Chinese)
- 19 秦琳琳. 深液流栽培试验温室温度系统的建模与控制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.  
Qing Linlin. Modeling and control of temperature system in a greenhouse by deep flow technique of nutrient solution [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- 20 Vladimir Bobal, Marek Kubalcik, Petr Dostal, et al. Adaptive predictive control of time-delay systems [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2013, 66(2): 165 - 176.
- 21 Patil S L, Tantau H J, Salokhe V M. Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models [J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 423 - 431.

## Model Predictive Control of Air Temperature in Greenhouse Based on CFD Unsteady Model

Zhou Wei<sup>1,2</sup> Li Yongbo<sup>1</sup> Wang Xiaochan<sup>1</sup>

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

2. Mechanical and Transportation Institute, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** A model predictive control of air temperature in greenhouse based on unsteady CFD model was proposed. Considering the air temperature in greenhouse as the research object and CFD model as a virtual greenhouse environment, the input/output time series data of the system were provided by the unsteady CFD numerical simulation instead of the real physical experiment data. Then the CFD model was converted into system control model based on the data by system identification. The roof ventilation cooling process was controlled by MBPC method based on CFD model. The results showed that the average control error and the standard control error were 2.65°C and 3.27°C, respectively. The indoor temperature was controlled smoothly and effectively under the allowed range of crop growth. System identification and control algorithm combine with the CFD model improved the efficiency of controller design. This design technique can enrich the technology in greenhouse control system.

**Key words:** Greenhouse Modelling CFD System identification Model based predictive control