

# 机械通风条件下连栋温室速度场和温度场的 CFD 数值模拟

童莉<sup>1</sup> 张政<sup>1</sup> 陈忠购<sup>2</sup> 张天柱<sup>2</sup>

(1. 北京化工大学 化学工程学院,北京 100029; 2. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

**摘要** 为了解温室内部气流和热量传递过程,设计合理的通风设施,建立了无植物条件下湿帘机械通风的华北型连栋塑料温室三维数值模拟模型,并使用 CFX 计算流体力学软件进行了数值模拟计算。得到了合理的速度场分布和温度场分布数值模拟结果,并与试验值进行了对比。与试验值相比,模拟结果误差 5%,在入口风速  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,入口气温  $26^\circ\text{C}$  (热浮力的影响较小)的情况下效果更好。讨论了入口风速和湿帘高度对温室可控距离的影响:提高入口风速可以增大温室的可控距离,湿帘高度越大,可控距离越大。湿帘高度在  $1.2 \sim 1.25 \text{ m}$  之间时,相同湿帘高度下,纵向距离为  $50 \text{ m}$  的温室,其可控距离略小于  $40 \text{ m}$  的温室;当湿帘高度超过  $1.25 \text{ m}$  时,纵向距离为  $50 \text{ m}$  的温室可控距离大于  $40 \text{ m}$  的温室。

**关键词** 机械通风;温室;太阳辐射;计算流体力学

**中图分类号** S 625.51; TP 391.9

**文章编号** 1007-4333(2003)06-0033-05

**文献标识码** A

## Simulation of mechanical ventilation for Huabei-type multispan plastic greenhouse

Tong Li<sup>1</sup>, Zhang Zheng<sup>1</sup>, Chen Zhonggou<sup>2</sup>, Zhang Tianzhu<sup>2</sup>

(1. Chemical Engineering College, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Mass and heat transfer in the mechanically ventilated Huabei-type multispan plastic greenhouse without plants was numerically simulated using commercial software CFD and CFX to make the airflow and heat transfer clear in the greenhouse and design ventilation equipment rationally. The prediction gives rational velocity and temperature distributions, which have been compared with the measured values of velocity and temperature. The error between the measured and the predicted value is less than 5%. It is better at the conduction of inlet air velocity less than  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and inlet air temperature less than  $26^\circ\text{C}$ . Finally, it is also discussed that the effect of the inlet air velocity and the height of cooling pad on the controllable distance of the studied greenhouses. The controllable distance increase when the inlet air velocity increased. The higher the height of cooling pad, the larger the controllable distance. The controllable distance of the  $50 \text{ m}$  greenhouse is less than that of the  $40 \text{ m}$ 's when the height of cooling pad is between  $1.2$  to  $1.25 \text{ m}$ , and is larger than that of the  $40 \text{ m}$ 's when the height of cooling pad exceed  $1.25 \text{ m}$ .

**Key words** mechanical ventilation; greenhouse; solar radiation; computational fluid dynamics

温室夏季降温常采用自然通风或机械通风方式。自然通风降温效果有限,机械通风配合湿帘降温效果良好,且便于自动控制,是目前较先进的通风降温方式<sup>[1]</sup>。

1989年,Okushima等<sup>[2]</sup>首次应用计算流体力

学(Computational Fluid Dynamics, CFD)研究温室通风问题,但所得结果与其<sup>[2]</sup>试验结果不很吻合。1998年,Shklyar和Arbel<sup>[3]</sup>采用  $k-\epsilon$  湍流模型和修正的SIMPLER算法对自然通风条件下的温室气流场进行了二维分析与计算。应用CFD方法对机械

收稿日期:2002-12-18

基金项目:“十五”国家科技攻关项目“工厂化农业关键技术与示范”(2001BA503B61)

作者简介:童莉,硕士,主要从事环境工程、计算流体力学方面的研究;通讯作者:张天柱,博士,副教授,主要从事设施农业生物环境工程领域和产业化方面的研究

通风温室三维气流场的研究主要集中于畜禽舍。1992 年 Hoff 等<sup>[4]</sup>采用修正的  $K$ -模型对无牲畜强制通风的畜舍气流场进行了计算,结果表明该模型与实际情况符合较好;1999 年张天柱等<sup>[5]</sup>用简化的 CFD 模型对高密度迭层笼养蛋鸡舍气流场进行了数值模拟,给出了相应的鸡舍内气流场的分布。考虑太阳辐射的室内环境因素的 CFD 研究主要是针对有空调的建筑物。童灵和陈芝久<sup>[6]</sup>用蒙特卡罗方法分析了太阳辐射的能量在空调房内各固体表面的再分配,以其定量分布作为附加热源,结合空气的湍流流动和热浮升力等条件,进行了三维气流场与温度场的数值计算,获得了较合理的结果。

目前尚未发现对温室的强制通风和太阳辐射同时进行 CFD 研究的报道。笔者采用 CFX 软件对机械通风和太阳辐射同时作用下华北型联栋温室(北京市富通环境工程公司开发)的三维气流场和温度场进行了数值模拟研究。考虑到温室中植物存在条件下计算模型的复杂性,作为初步研究,本研究暂不考虑植物存在的影响。

### 1 模型和计算条件

#### 1.1 数学模型和基本控制方程

本文中假设温室内空气的湍流流动符合  $K$ -湍流模型,并在近壁处采用壁面函数法。在此假设的基础上,计算域内的空气流动及传热满足:

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(T - T_{\text{ref}})$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wT)}{\partial z} =$$

$$\frac{q}{C_p} + \frac{\mu_{\text{eff}}}{C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

湍流能量耗散方程

$$\frac{\partial(\rho uK)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vK)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wK)}{\partial z} =$$

$$K \left( \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial z^2} \right) + S_K$$

湍流能量耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial z} =$$

$$\left( \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \right) + S$$

其他参数值的选用详见文献[4]。

#### 1.2 太阳辐射

图 1 示出实验温室物理模型示意图。当阳光照射到温室的屋顶覆盖层时,一部分被其表面反射或折射,一部分被其吸收,其余的则进入温室。进入温室的太阳辐射,一部分被空气介质吸收,其余的被四周固体表面和地面吸收。温室空间几何表面间的辐射换热采用 CFX 软件中的蒙特卡罗方法计算。

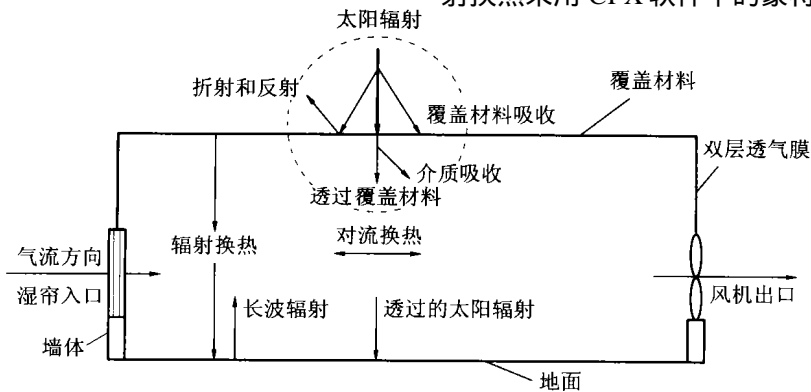


图 1 实验温室物理模型示意图

Fig. 1 Physical model of the experiment greenhouse

### 1.3 边界条件与初始条件

假设近壁处的气流流动符合单层壁面函数法的对数分布规律,并给定入口处气流速度和气温。由于温室的保温功能,故给定墙体和地面的对外传热条件为绝热。

太阳辐射以常量形式加入边界。根据华北地区

夏季高温天气的太阳辐射强度( $W \cdot m^{-2}$ )选取覆盖材料,其透光率 75.5%(单层膜透光率 87.0%),吸收率 10.5%。内墙面辐射换热条件见表 1。

方程的求解采用 CFX4.3 软件,共划分  $25 \times 15 \times 50 = 18\,750$  个结构化网格,  $x$  和  $y$  方向为均匀分布网格,  $z$  方向为两端加密网格,加密比例为 3:1。

表 1 边界内墙面的辐射换热条件

Table 1 Heat exchange of the boundaries

固体表面	类别	灰度	面积/ $m^2$	气流速度/ $(m \cdot s^{-1})$	太阳辐射强度/ $(W \cdot m^{-2})$	条件
入口	灰体	0.8	9.6	给定		给定入口气流温度
出口	灰体	0.8	3.6			
覆盖材料	灰体	0.2	146.0		给定	吸收的太阳辐射为热流量
双层透气膜	灰体	0.2	39.2			给定温度
墙体内墙面	灰体	0.8	9.6			给定温度
地面	灰体	0.8	144.0			给定温度

## 2 数值模拟结果与讨论

### 2.1 速度场和温度场的计算值与试验值

华北型连栋温室的东西面和顶面均为双层充气塑料膜。温室共有 3 连栋,本研究仅考虑其中间的 1 栋(长 18 m),东西两面作为对称面处理。图 2 为

实验温室测量速度场和温度场的布点示意图,温湿度的测量采用 Dlink 3000 传感器。图 2 中 T 和 H 分别为温度探头和湿度探头位置,在温度探头处用手持式热敏风速仪进行风速测量。其中  $T_a$  表示温室内部空间布点位置,  $T_r$  表示温室壁面温度探头布点位置。湿度测定用于校正温度探头,限于篇幅本

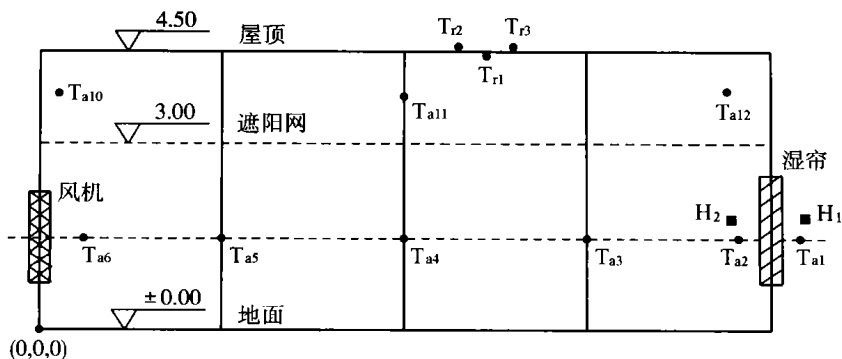


图 2 实验温室速度场和温度场的测量位置示意图

Fig. 2 Measure position of the velocity and temperature distribution in the experimental greenhouse

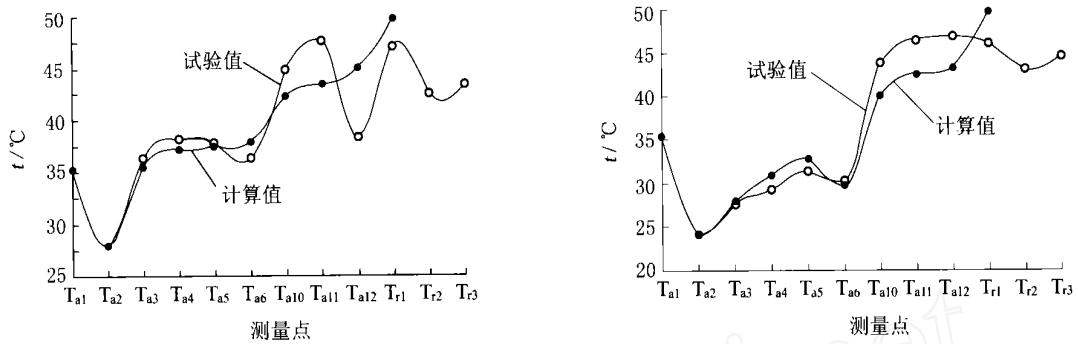
文中不讨论湿度问题。

取实测值作为边界条件,对不同条件下实验温室的温度场进行计算,计算与试验结果见图 3。结果表明,利用 CFX 软件得到的计算结果与试验值相比,相对误差在 5%以内,基本上可以反映真实情况。在入口风速  $1.5 m \cdot s^{-1}$ ,入口气温 26 (热浮力的影响较小)的情况下效果更好。速度场的计算值与试验值大体趋势是吻合的,但是由于速度场的测量受外界条件的干扰相对比较大,而且测量工

具的误差范围较大,所以局部的计算值与试验值吻合得不是很好。

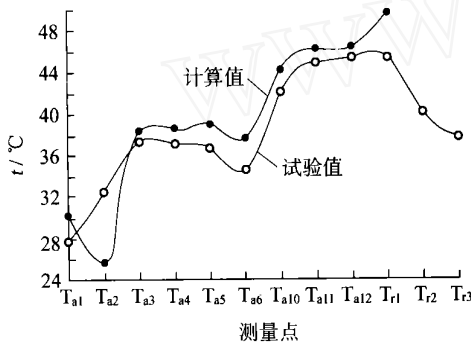
试验结果表明,采用 CFX 软件对华北型连栋温室的模拟计算较为成功,可以用这一方法指导温室结构和工况的优化。

图 4 示出入口风速为  $0.80 m \cdot s^{-1}$  时计算得到的温室速度场分布图。可以看出温室内速度场的基本分布情况。

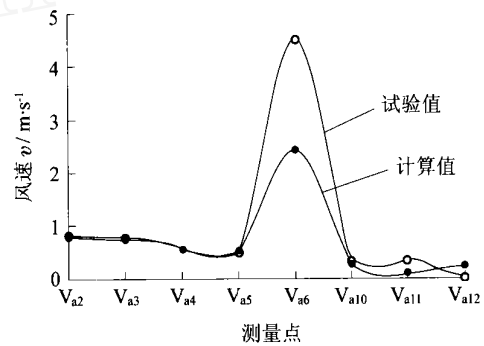


(a) 入口风速  $0.40 \text{ m s}^{-1}$ , 入口气温  $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 太阳辐射强度  $780 \text{ W m}^{-2}$ , 环境温度  $35.3 \text{ }^\circ\text{C}$

(b) 入口风速  $0.75 \text{ m s}^{-1}$ , 入口气温  $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 太阳辐射强度  $780 \text{ W m}^{-2}$ , 环境温度  $35.3 \text{ }^\circ\text{C}$



(c) 入口风速  $0.10 \text{ m s}^{-1}$ , 入口气温  $24.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , 太阳辐射强度  $778 \text{ W m}^{-2}$ , 环境温度  $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$  (关闭风机、侧窗及天窗)



(d) 入口风速  $0.80 \text{ m s}^{-1}$

图 3 实验温室速度场和温度场的试验结果

Fig. 3 The result of velocity and temperature distributions of the experimental greenhouse

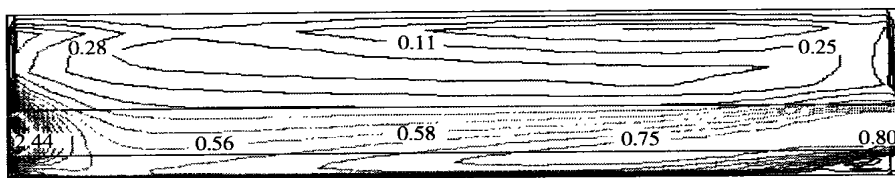


图 4 入口风速为  $0.80 \text{ m s}^{-1}$  的预测速度场分布图

Fig. 4 Velocity distributions with inlet air velocity  $0.80 \text{ m s}^{-1}$

### 2.2 温室可控距离与入口风速和湿帘高度的关系

温室可控距离是指自湿帘入口沿气流方向到作物最高适宜生长温度 ( $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的温室长度。华北地区夏季的极端高温期, 太阳辐射强度可达  $800 \sim 900 \text{ W m}^{-2}$ , 改变温室入口风速, 计算得到此条件下温室可控距离与入口风速的关系 (图 5)。可见随入口风速的提高, 温室可控距离增大; 但当风速小于  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  时, 可控距离增幅较小; 风速大于  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  时, 其增幅较大。

选取华北地区典型的夏季气候条件, 即太阳辐

射强度  $700 \text{ W m}^{-2}$ , 环境温度  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温室入口风速  $0.80 \text{ m s}^{-1}$ , 入口气温  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , 忽略室内气体对太阳辐射的吸收。改变湿帘高度进行数值模拟, 考察湿帘高度对温室可控距离的影响 (图 6)。可以看出, 湿帘高度越大, 可控距离越大。对于纵向距离为  $30 \text{ m}$  的温室, 取  $1.2 \text{ m}$  高的湿帘即可;  $40 \text{ m}$  的温室需要  $1.5 \text{ m}$  高的湿帘;  $50 \text{ m}$  以上的温室,  $1.5 \text{ m}$  高的湿帘将无法使整个温室控制在适宜温度内。湿帘高度为  $1.2 \sim 1.8 \text{ m}$  时, 温室的可控距离可达  $22.5 \sim 47.0 \text{ m}$ 。湿帘高度在  $1.20 \sim 1.25 \text{ m}$  之间时, 相同湿

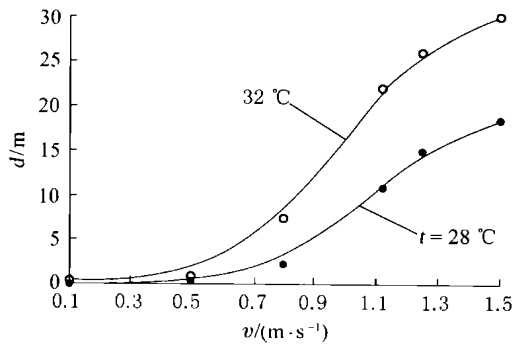


图5 入口风速  $v$  与温室可控距离  $d$  的关系

Fig. 5 Effect of the inlet air velocity on the controllable distance of the studied greenhouses

帘高度下,纵向距离为 50 m 的温室,其可控距离略小于 40 m 的温室;当湿帘高度超过 1.25 m 时,在相同的湿帘高度下,50 m 温室的可控距离大于 40 m 的温室。但风速小于  $0.5 m \cdot s^{-1}$  时,可控距离增幅较小;风速大于  $0.5 m \cdot s^{-1}$  时,可控距离增幅较大。

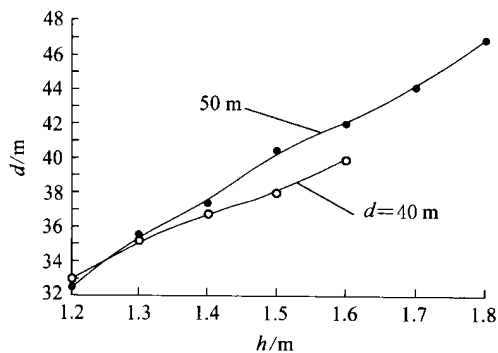


图6 湿帘高度  $h$  与温室可控距离  $d$  的关系

Fig. 6 Effect of the height of cooling pad on the controllable distance of the studied greenhouses

### 3 结论

使用商用软件 CFX 中的三维、稳态的 CFD 模型对华北型联栋塑料温室的气流场和温度场进行了初步数值模拟和预测(考虑植物存在的影响有待进

一步研究),主要结论如下:

1) 通过对实际情况进行合理简化,CFX 软件的模拟结果与试验值吻合较好,基本可以反映真实情况,在入口风速  $1.5 m \cdot s^{-1}$ ,入口气温 26 (热浮力的影响较小)的情况下效果更好。

2) 通过改变入口风速和湿帘高度,可以调控温室内气温。提高入口风速可以增大温室的可控距离,湿帘高度越大,可控距离越大。湿帘高度在 1.20~1.25 m 之间时,相同湿帘高度下,纵向距离为 50 m 的温室,其可控距离略小于 40 m 的;当湿帘高度超过 1.25 m 时,纵向距离 50 m 的温室可控距离大于 40 m 的温室。

感谢中国农业大学理学院徐泳教授的指导。

### 参考文献

- [1] 黄之栋,周军,丛国英. 华北型连栋塑料温室工程简介[J]. 农村实用工程技术,1998(9):5~7
- [2] Okushima L, Sase S, Nara M. A support system natural ventilation design of greenhouses based on conditional aerodynamics[J]. Acta Hort,1989(248):129
- [3] Krigsvoll G. Kameleon Greenhouse. A simulation model for fluid flows, mass and heat transfer in greenhouse[D]. Oslo (Norway): Agricultural University of Norway, 1993.
- [4] Herral B B, Boon C R. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals[J]. Agricultural Engng Res, 1997(66):221~228
- [5] 张天柱,徐泳,黄之栋,等. 高密度迭层笼养蛋鸡舍内气流场的数值模拟[J]. 农业工程学报,1999,15(增刊):38~43
- [6] 童灵,陈芝久. 太阳负荷下空调房间的效果分析[J]. ACTA Energize Solar is Sin ICA,1998,19(4):408~413