

## Venlo 型温室夏季自然通风降温的 CFD 数值模拟

李永欣 李保明 李真 丁涛

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

**摘要** 采用 CFD(computational fluid dynamics)方法对 Venlo 型温室夏季采用室外遮阳和屋顶喷淋措施的自然通风降温过程进行了数值模拟。模拟时对整个计算域采用六面体网格进行划分,对温室天窗附近区域的网格进行了加密处理,生成的网格总数约为  $10^6$  个。温室 CFD 数值模拟以室内外空气作为研究对象,外界气象条件、温室围护结构、室外遮阳与屋顶喷淋、室内植物和土壤等作为数值模拟的边界条件进行处理。对 Venlo 型温室在室外遮阳和屋顶喷淋措施下室内空气温度的变化以及在整个温室空间的分布进行了数值模拟,同时进行了 Venlo 型温室内温度的现场试验测试。CFD 模拟结果和试验测试结果均表明:室外遮阳和屋顶喷淋使温室内空气温度得到有效降低。CFD 模拟得到的 Venlo 型温室内温度平均值与试验测试结果的平均差值为 1.7,平均偏差为试验测试结果的 5%;数值模拟得到的温室内温度的空间分布变化趋势也与试验测试结果一致。

**关键词** 温室;自然通风;CFD;数值模拟

中图分类号 S 625.51

文章编号 1007-4333(2004)06-0044-05

文献标识码 A

### CFD simulation of a naturally ventilating cooling process for a venlo greenhouse in summer

Li Yongxin, Li Baoming, Li Zhen, Ding Tao

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

**Abstract** The cooling process of shading and roof sprinkling were investigated in a naturally ventilated venlo greenhouse with computational fluid dynamics (CFD) method and the governing equations, grid generation and boundary conditions of the CFD method were introduced. Air temperature change and distribution inside the greenhouse with shading and roof sprinkling were both numerically simulated and tested. The average air temperature inside the greenhouse obtained from the CFD simulation is 1.7 higher than that from the measurement, and the simulating result of air temperature distribution inside the greenhouse is also agreed well with the measured ones.

**Key words** greenhouse; natural ventilation; computational fluid dynamics; numerical simulation

连栋温室的夏季降温问题始终是困扰我国温室产业的一个难题,单独采用自然通风进行降温,受外界气候的影响大,难以进行人工控制,降温效果不能满足植物生长的需要;采用湿帘风机降温系统虽然降温效果好,但是运行能耗高,而且降温效果受风机和湿帘之间距离的影响,对温室的尺寸有一定的限制。为了解决这一问题,一些连栋温室室外安装了遮阳网和喷淋系统,在自然通风的基础上结合室外

遮阳和屋顶喷淋措施进行降温,取得了较好的夏季降温效果<sup>[1~3]</sup>。国内外对于这种自然通风降温系统的研究较少,外界气象因素、室外遮阳和屋顶喷淋措施对连栋温室室内环境的影响机理尚不清楚。

目前国内外针对温室研究建立的模型主要有以下几种:基于质量平衡原理的水蒸气平衡模型(vapor balance model);基于能量平衡原理的温室静态模型和动态模型(greenhouse static model & dynamic

收稿日期:2004-07-15

基金项目:高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

作者简介:李永欣,副教授,博士,主要从事农业生物环境工程研究;李保明,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事农业生物环境工程研究,E-mail:libm@cau.edu.cn

model); 基于计算流体力学 (computational fluid dynamics) 的温室 CFD 模型<sup>[4]</sup>。CFD 方法在温室研究中的应用有十几年的历史, 1989 年 Okushima 采用 CFD 方法预测了小型温室的环境, 并将 CFD 模拟结果与 Sase (1984 年) 的风洞试验结果进行了对比, 但受当时计算机硬件条件和 CFD 程序计算能力的限制, CFD 模拟结果与风洞试验结果不具有相关性; 1997 年 Mistriotis 再次进行了 CFD 模拟, 其结果与 Sase 的风洞测试结果具有很好的一致性<sup>[5]</sup>; 1999—2001 年 Boulard 等, Lee 和 Short, Al-Helal, Reichrath 等分别采用 CFD 研究方法对不同类型的温室进行了研究, 模拟结果与试验测试结果都能够较好地吻合<sup>[6,7]</sup>。CFD 方法在温室研究中得到广泛应用。

CFD 方法的独特优势在于: 可以通过数值模拟得到空气压力、流速、温度、湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度等参数在整个温室室内外空间上的分布<sup>[4]</sup>。为此, 笔者采用 CFD 方法对 Venlo 型温室夏季结合室外遮阳和屋顶喷淋措施的自然通风降温过程进行了研究。

## 1 Venlo 型温室的 CFD 建模

### 1.1 控制方程

自然通风条件下温室内空气流速较低, 且流动过程中空气温度变化不大, 其通风过程可视为不可压缩流体运动, 因此 CFD 数值模拟的基本控制方程由连续性方程、Navier-Stokes 方程和能量方程构成。另外, 温室的自然通风过程具有明显的湍流特征, CFD 数值模拟采用雷诺时均法将流动参数的瞬时值分解为时均值和脉动值两部分代入基本控制方程。目前已经有多种湍流模型对湍流的脉动值和时均值进行处理。本文中采用目前在工程中应用广泛的  $k$ - $\epsilon$  湍流模型<sup>[4]</sup>对 Venlo 型温室自然通风降温过程进行 CFD 模拟。

### 1.2 网格生成

为了与试验测试结果进行对比, CFD 模拟的温室结构与进行试验测试的 Venlo 型温室完全相同, 温室长度方向有 8 跨, 每跨 9.6 m, 共 76.8 m; 宽度方向有 14 个开间, 每个开间 4.5 m, 共 63 m; 温室檐高 4 m。室内外空气通过屋顶天窗流入或流出温室, CFD 模拟时选取温室空间以及部分室外空间作为计算域, 室外空间取长方体区域 (图 1)。室外区域的选取对 CFD 数值模拟具有双重影响, 所取区域越大, 与实际空气流动情况吻合越好; 但是计算域的

网格数目将会增大, 使数值计算的时间变得漫长。本次 CFD 数值计算的室外空间区域高度 16 m, 宽度 103 m (在温室两侧各加宽 20 m), 长度 132.8 m (温室迎风面加长 16 m, 背风面加长 50 m。背风面加长 50 m 是为了消除温室背风面空气回流对计算收敛效果的影响)。

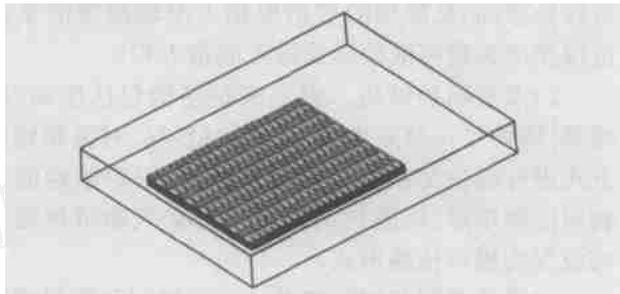


图 1 Venlo 型温室 CFD 数值模拟的计算域  
Fig. 1 CFD simulation domain of venlo greenhouse

在 CFD 数值模拟中, 每个控制体积都由一个网格节点来代表, 网格节点的生成对 CFD 数值模拟至关重要。在 Venlo 型温室的自然通风过程中, 室内外空气通过温室天窗流入和流出温室, 进行室内外物质和能量的交换, 天窗附近区域空气的流动状态也十分复杂, 因此网格划分时对温室天窗附近区域的网格进行了加密处理 (图 2)。整个计算域采用六面体网格进行划分, 生成的网格总数约为  $10^6$  个。

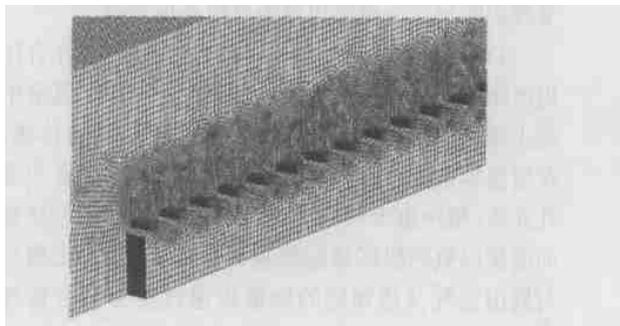


图 2 Venlo 型温室 CFD 数值模拟的网格划分  
Fig. 2 Grid generation of venlo greenhouse

### 1.3 边界条件

温室 CFD 数值模拟以室内外空气作为研究对象, 外界气象条件、温室围护结构、室外遮阳与屋顶喷淋、室内植物和土壤都作为数值模拟的边界条件进行处理。边界条件处理得准确与否对数值模拟的准确性有直接影响。

1) 外界气象条件。外界气象条件包括室外空气温湿度、室外风速和风向、太阳辐射等条件。初始时

刻的室外空气温湿度根据实测值以初始值的形式输入;室外风速和风向以速度进口边界条件输入,在计算时选择长方体室外空间区域的一个面作为进口,根据室外风速和风向的实测值以速度矢量的形式输入;太阳辐射使温室内空气能量得到增加,在数值模拟中,通过在能量方程中加入太阳辐射的能量源项进行处理,能量源项的数值根据太阳辐照度的实测值以多项式或离散值形式输入能量方程。

2) 温室围护结构。温室围护结构包括屋面、侧墙等,围护结构与室内外空气通过传导、对流和辐射方式进行能量交换。在数值模拟中,围护结构的材料属性确定后,将围护结构与两侧空气能量传递方式设置为耦合传热形式。

3) 室外遮阳与屋顶喷淋。室外遮阳和屋顶喷淋的边界条件处理是数值模拟的难点。遮阳网的遮蔽作用使进入温室的太阳辐射能量明显降低,屋顶喷淋的蒸发降温作用使喷淋区域的空气温度下降,这一过程中涉及伴随相变的湿空气的流动和能量传递过程,目前对其进行直接模拟存在一定困难。本次数值模拟中,对遮阳网下的计算域,根据遮阳网的遮光率对能量方程中太阳辐射的能量源项数值进行折减;而对屋顶喷淋区域,模拟时直接将喷淋区域空气温度的实测值以离散形式输入。模拟计算结果表明,这种处理方法能够较好地解决 CFD 模拟过程中室外遮阳和屋顶喷淋边界条件的处理难题。

4) 植物层与土壤。室内植物通过蒸腾和光合作用不断与周围的空气进行物质和能量传递,温室中的土壤与室内空气之间也存在着物质和能量传递。在数值模拟中,将温室内植物层空间区域设置为多孔介质,植物由于蒸腾和光合作用与周围空气交换的能量以植物层区域的能量源项形式输入;土壤层与周围空气及植物层的能量传递设置为耦合传热形式。

## 2 试验材料与方法

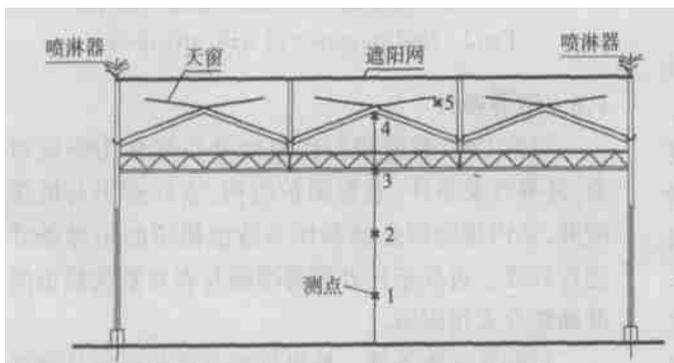
### 2.1 试验温室

试验温室位于河南省濮阳市世锦园内(北纬 $36^{\circ}$ ,东经 $115^{\circ}$ ),为 Venlo 型玻璃温室,共有 8 跨,每跨 9.6 m;共有 14 个开间,每个开间 4.5 m;檐高 4 m。温室屋顶坡面与水平面成  $22^{\circ}$ ,屋面和侧墙均采用厚度 4 mm 的园艺玻璃。温室依靠屋顶天窗通风,屋顶天窗间隔布置,天窗的开启由电机驱动齿条机构完成。温室加装室外遮阳网和屋顶喷淋系统,室外遮阳网距屋脊 0.4 m,遮阳网遮光率为 50%,由电机驱动镀锌管通过钢丝绳拉动。屋顶的喷淋器安装在遮阳网上方。试验时温室内种植了红掌,植株高约 1.0 m。

### 2.2 试验测试方法

温室室外气象参数如空气温湿度、风速和风向、太阳辐照度等数据,由位于温室南侧墙上高度为 6 m 的温室室外气象站在计算机控制下自动采集。温室室内垂直方向的空气温度由 Pt100 温度传感器进行测试。经测试,温室室内空气温度南北和东西方向差异不大,因此测点布置在温室中心,沿垂直方向取 5 个测点(图 3),温度传感器的数据由数据记录仪记录。植物叶面、温室围护结构和土壤温度采用 Raynger ST30 型手持式红外测温仪测量。太阳辐射采用 2 个辐照度传感器进行测量:一个安装在室外遮阳网的上方,测量温室室外辐照度;另一个安装在室内植物冠层高度(1.0 m),测量温室室内辐照度。室内外辐照度也由数据记录仪记录。

测试期间(2001-07-25 T12:50—13:20)温室天窗完全打开,室外遮阳网展开覆盖整个温室区域,屋顶喷淋系统分别于 13:05 和 13:10 进行喷淋,每次持续 2 min;外界空气温度在  $34^{\circ}\text{C}$  左右波动,室外风速为 0。



测点	1	2	3	4
高度/m	1.0	2.3	3.5	4.9

图 3 Venlo 型温室室内温度测点布置图  
Fig. 3 Air temperature measuring locations in venlo greenhouse

### 3 结果与分析

#### 3.1 温室室内温度变化的 CFD 模拟

图 4 示出 Venlo 型温室内部及喷淋区域空气温度测试结果。可以看出：喷淋开始前，温室室内各高度的空气温度以及喷淋区域的空气温度逐渐上升；喷淋以后，喷淋区域的空气温度迅速降低，室内温度也随之下降，经过 2 次喷淋，室内平均温度低于室外；喷淋停止后，室内各高度空气温度以及喷淋区域空气温度又开始逐渐上升。室外遮阳和屋顶喷淋措施使温室室内温度明显降低。

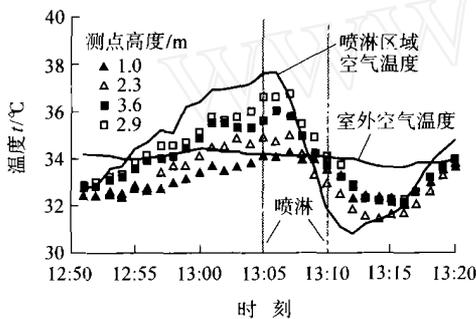


图 4 Venlo 型温室室内温度变化的实测结果

Fig. 4 Measuring results of air temperature change in venlo greenhouse

对 Venlo 型温室在室外遮阳和屋顶喷淋措施下的室内温度变化进行 CFD 数值模拟，模拟时将 Venlo 型温室试验测试期间的外界气象参数如室外温度，太阳辐照度等作为边界条件进行输入，对室外

遮阳和屋顶喷淋、温室围护结构、植物层和土壤分别根据试验测试值进行边界条件设置。图 5 示出 Venlo 型温室室内温度变化的 CFD 数值模拟结果，可以看出 CFD 数值模拟的室内温度变化趋势与试验测试结果基本一致。CFD 模拟的室内温度平均值与试验测试结果的平均差值为 1.7，平均偏差为试验测试结果的 5%，说明 Venlo 型温室室内温度 CFD 数值模拟结果与试验测试结果基本一致。

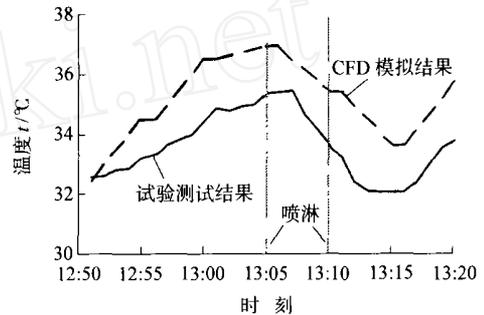


图 5 Venlo 型温室室内温度变化的 CFD 模拟结果与实测结果

Fig. 5 Comparison of air temperatures from CFD simulation and measurement in venlo greenhouse

#### 3.2 温室室内温度分布的 CFD 模拟

采取室外遮阳和屋顶喷淋措施后，Venlo 型温室室内温度分布 CFD 模拟结果见图 6。可以看出，由于受到太阳辐射的影响，随着时间的推移，温室室内温度以及遮阳网下空气温度开始上升 ( $t = 5 \text{ min}$ )，其中遮阳网下空气温度上升较快 ( $t = 10 \text{ min}$ )； $t =$

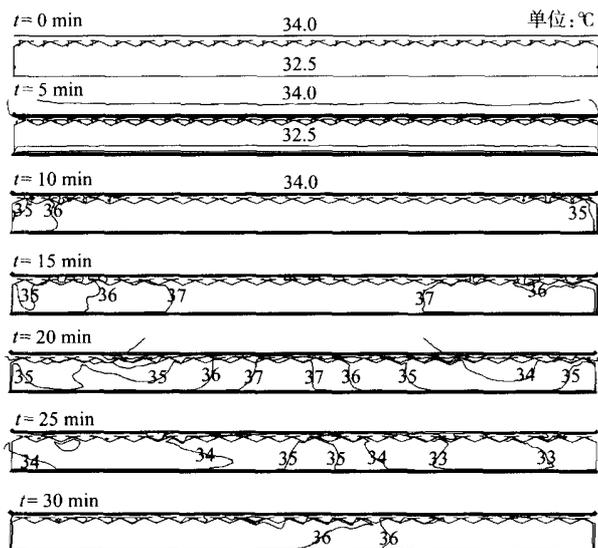


图 6 Venlo 型温室室内温度分布的 CFD 模拟

Fig. 6 CFD simulation of air temperature distribution in Venlo greenhouse

15 min 时温室室内温度进一步升高,且中部明显高于两端。 $t = 15$  min 时进行了第 1 次喷淋,其作用首先使遮阳网下空气温度降低,接着使温室室内温度降低; $t = 20$  min 的第 2 次喷淋使温室室内温度进一步降低,部分区域甚至低于室外( $t = 25$  min);喷淋停止后,温室室内温度又开始上升( $t = 30$  min)。CFD 模拟结果与试验测试结果一致。

#### 4 结束语

对采用室外遮阳和屋顶喷淋措施的 Venlo 型温室夏季自然通风降温系统进行的 CFD 数值模拟和试验测试结果表明,该系统可以明显降低温室室内温度,CFD 模拟的温室室内温度平均值与试验测试结果的平均差值为 1.7%,平均偏差为试验测试结果的 5%;CFD 模拟的温室室内温度分布变化趋势也与试验测试结果一致。CFD 研究方法在温室环境的研究中具有独特的优势,应用前景广阔。

#### 参 考 文 献

- [1] 李永欣,李保明,王朝元,等. 荷兰 Venlo 型连栋温室夏季自然通风降温系统的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2002,7(6):44~48
- [2] Li Yongxin, Li Baoming, Wang Chaoyuan, et al. Effects of shading and roof sprinkling in Venlo-type greenhouse in summer[J]. Transaction of CSAE,2002,18(5):127~130
- [3] Li Baoming, Li Yongxin, Wang Chaoyuan, et al. Experimental study on the cooling effect of shading and roof sprinkling in a Venlo-type greenhouse in middle China summer[J]. ASAE Annual Meeting Paper No. 034071. 2003
- [4] 李永欣. Venlo 型温室自然通风降温的试验研究与 CFD 模拟[D]. 北京:中国农业大学,2004
- [5] Mistriotis A, Bot G P A, Picuno P, et al. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 85:217~228
- [6] Boulard T, Haxaire R, Lamrani M A, et al. Characterization and modeling of the fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74:135~144
- [7] Lee I B, Short T H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse [J]. Transaction of ASAE, 2000, 43(3):745~753