

风压通风的单栋温室内部流场的 ANSYS CFD 模拟

王 健 汪小 ■ 丁为民

【摘要】 利用 ANSYS CFD 软件模拟了单栋温室内风速为 3 m/s 时的速度场,在此基础上比较了侧窗通风、侧窗加天窗组合通风等几种不同的通风方式下的温室内部流场变化。由理论推导和对模拟结果分析得出侧窗加天窗的通风布局的平均风速较高,因而通风率较高,对作物的损害较小。

关键词: 温室 通风 计算流体力学 流场

中图分类号: S625 **文献标识码:** A

ANSYS CFD Simulation of Airflow Distribution in a Tunnel Greenhouse under Wind Driven Situation

Wang Jian Wang Xiaohan Ding Weimin
(Nanjing Agricultural University)

Abstract

Simulation of airflow field in a tunnel greenhouse under the wind speed of 3 m/s was investigated with the use of CFD and ANSYS package. The aim of the simulation is to investigate the airflow pattern inside the tunnel greenhouse. Through comparing the airflow field of three ventilators configurations and average wind speeds, it was concluded that the configuration of side and roof ventilation is the best pattern for ventilation.

Key words Greenhouse, Ventilation, Computational flow dynamics, Airflow field

引言

温室通风性能应满足 3 个要求^[1]:①给温室提供足够的空气交换。②将温室内部热空气与外部空气充分混合,调节室内温度和湿度。③在温室内部形成一定的空气流动,以使植物与空气之间进行足够的热量交换。自然通风有热压通风和风压通风 2 种形式。对于利用侧窗或侧窗加天窗通风的温室来说风压是最重要的影响因素。试验证明当风速大于 2 m/s 时温室内的热压作用可以忽略^[2~3]。国内有研究者认为^[4]:对于温室的通风效果而言,热压作用的变化相对较小,而风压作用的随机性很大。由于温室大多采用风压通风,因此由风压引起的自然通风对温室具有重要作用。针对这种情况,本文用 ANSYS CFD 模拟利用风压通风的温室内部流场的

变化^[5]。

1 理论

1.1 风压作用下通风

Boulard 和 Baille^[6~7]给出了通风量 G 的计算公式,当只考虑风压的影响时通风量为

$$G = (S/2)AC_w^{0.5}\bar{v} \quad (1)$$

式中 S ——通风口横截面积, m^2

A ——通风口分布系数

C_w ——风压影响系数

\bar{v} ——平均风速, m/s

通过通风量可以得到温室的空气交换率,即每小时换气次数

$$N = 3\ 600\ G/V \quad (2)$$

式中 V ——温室的体积, m^3

收稿日期: 2005-08-24

王 健 南京农业大学工学院 博士生, 210031 南京市

汪小 ■ 南京农业大学工学院 副教授

丁为民 南京农业大学工学院 教授 博士生导师 通讯作者

由式(1)和式(2)得

$$N = \frac{3600S}{V} AC_w^{0.5} \bar{v} \quad (3)$$

式(1)表明在不考虑热压作用的通风情况下, 风速和通风量成正比。式(3)说明风速和温室内部的空气交换率成正比。

1.2 计算流体力学(CFD)理论

CFD 模拟的输出结果包括流体的速度和方向、压力、温度在空间和时间上的分布。由于各种温室的结构形式、结构尺寸以及采用的通风方式和设施不同, 所以没有普遍适用的 CFD 模型。只有根据不同的温室类型, 采用适当的 CFD 模型进行模拟研究。CFD 研究以三大守恒定律(质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律)作为计算的控制方程^[8]。采用有限元方法把连续的计算区域离散成许多个子区域, 借助高性能计算机在每个单元上对控制方程组进行数值求解, 以速度、压力作为求解的原始变量, 进而在整个计算域上分析流体。其总的能量方程为^[9]

$$\frac{\rho\varphi}{t} + \text{div}(\rho\varphi\mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad}\varphi) + S_\varphi \quad (4)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m^3

\mathbf{v} ——速度, m/s Γ_φ ——广义扩散系数

S_φ ——广义源项 φ ——通用变量

2 模拟

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。该软件最先集成了 CFD 功能^[10]。虽然利用 CFD 模拟温室内部气候环境才刚刚起步, 但 ANSYS 中 FLOTRAN 的分析功能可以适用大多数的流体问题分析。近几年来, FLOTRAN CFD 在园艺领域中的应用主要是模拟温室室内的气候环境, 然后利用这些模型来研究温室室内环境对外部环境和温室环境控制的响应^[11~12]。

本文主要以温室室内外空气作为研究对象, 运用 CFD 对侧窗通风或侧窗加天窗组合通风的模拟。

入口采用速度边界条件, 出口采用压力边界条件。温室的结构参数见表 1。

表 1 温室的结构尺寸

Tab. 1 Dimension of greenhouse m

参数	跨度	长度	脊高	肩高	通风口宽
数值	8	20	4.1	2.5	0.9

3 模拟结果与讨论

3.1 不同的通风方式下温室内部流场

3.1.1 通风布局 1

温室两面开有侧窗而无天窗情况下, 其通风模拟结果如图 1a 所示。从图 1a 可看出: 在进风口和出风口形成“喷射流”, 风速最大; 在靠近顶层形成逆时针的回流区域, 在回流区下游流动趋于缓和。图中易见温室内部大部分气体没有得到充分的混合, 会发生屋顶积热现象。这种通风布局方式缺点是强烈的空气流会对作物产生一定的破坏作用。

3.1.2 通风布局 2

当温室两面开有侧窗且顶部开有天窗时, 其通风模拟结果如图 1b 所示。从图 1b 可看出: 温室内部回流区域较多。在屋顶上形成逆时针的回流区; 在下风口形成顺时针的回流区。这种通风布局方式使得温室内部空气混合十分均匀, 便于更好地调节温室内部温度和湿度, 使得室内作物与空气之间能进行足够的热量交换, 从而更适合作物的生长。

3.1.3 通风布局 3

当温室一面开有侧窗且顶部开有天窗时, 其通风模拟结果如图 1c 所示。从图 1c 可看出: 这种布局增加了温室上部空气的流动, 主流线从侧窗到天窗; 同时可以看到 2 个回流区: 温室的右边是一顺时针的回流区, 左上角是强度较弱逆时针回流区。在温室的右端, 风速为零, 因而通风效果不好。

3.2 温室内部平均风速变化比较

距地面 1.45 m 的水平线上(作物高度)取观测点作风速沿跨度方向的变化曲线, 如图 2 所示。从图

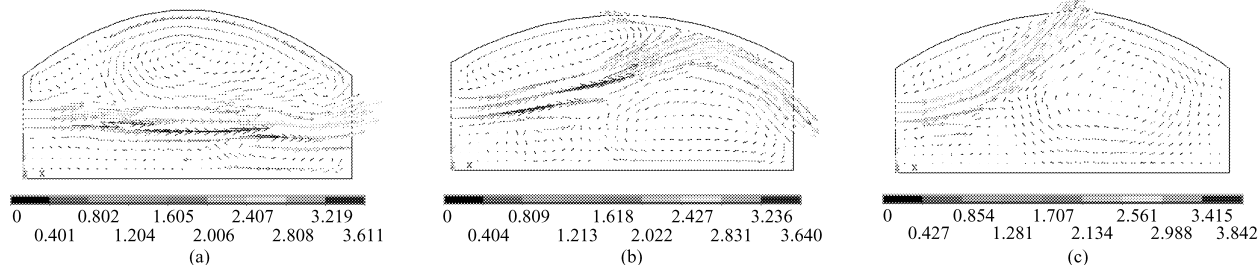


图 1 不同通风口的温室内部速度场

Fig. 1 Velocity field of different ventilators

(a) 布局 1 (b) 布局 2 (c) 布局 3

中可以看出,在进风口的附近风速有上升的趋势,在种植区(跨度为 0.8~7.2 m),布局 1 风速范围为 1.812~3.169 m/s,平均风速为 2.491 m/s;布局 2 风速范围 0.143~3.396 m/s,平均风速 1.770 m/s,大部分种植区风速适中;布局 3 风速范围为 -0.312~3.072 m/s,平均风速为 1.380 m/s,通风

效果很不好。由此可见布局 2 不但保证温室的通风,而且空气流对作物的破坏也相对较小。

从每种布局中任意取相同的 11 个节点比较平均风速的大小(表 2):布局 2 的平均风速最高为 1.125 4 m/s,因而在本文假设的风向垂直于通风窗时,相对应的通风量和空气交换率也最高。

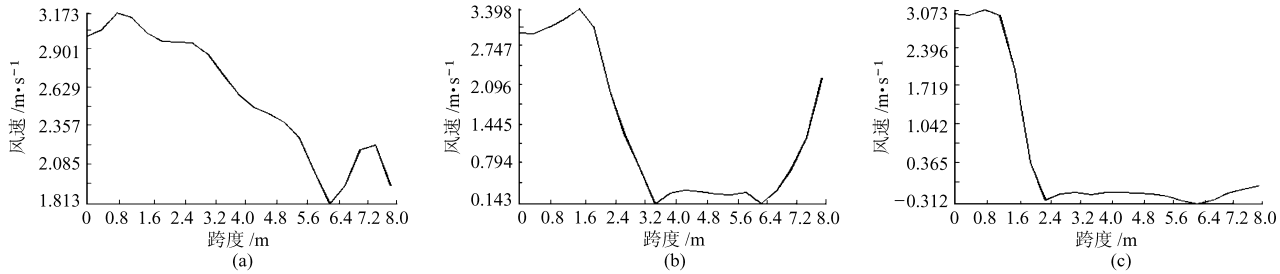


图 2 距地面 1.45 m 的水平方向上速度分布图

Fig. 2 Air velocity distribution 1.45 m along the greenhouse floor

(a) 布局 1 (b) 布局 2 (c) 布局 3

表 2 节点的平均风速

Tab. 2 Average wind speeds of nodes

m/s

布局	节点号											平均风速
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
布局 1	3.000 0	0.431 4	0.285 6	0.170 4	0.571 3	0.444 7	3.087 6	1.590 6	0.227 8	2.112 8	0.173 1	1.099 6
布局 2	0	0	3.026 0	2.994 0	0.180 5	0.214 7	0.358 9	0.034 2	3.049 0	0.719 1	1.803 0	1.125 4
布局 3	0	0.219 3	0.099 9	0.664 8	0.239 6	0.343 4	0.577 1	2.854 9	0.162 3	2.795 8	0.631 2	0.780 7

4 结束语

用 CFD 模拟温室的通风,可以预测内部压强、风速的变化,了解各种通风方式的通风情况。通风口设置不同,温室内部的流场分布就不相同,内部平均

风速也不同。模拟结果说明平均风速越大通风率也越高。通过以上分析得知布局 2(温室两面开有侧窗且顶部开有天窗时)的温室内部空气混合均匀,通风效果较好,也是大多数温室普遍采用的通风方式。

参 考 文 献

- 1 黄万欣. 自然通风温室及通风量研究[J]. 农机化研究, 2004(4): 53~54.
- 2 Bot G P A. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model[D]. Wageningen: Wageningen University, 1983.
- 3 Campen J B, Bot G P A. Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2003, 84(1): 69~77.
- 4 司慧萍, 苗香雯. 华东型连栋塑料温室自然通风开窗度模型及试验研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2005, 31(1): 113~118.
- 5 Montero J I, Hunt G R, Kamaruddin R, et al. Effect of ventilator configuration on wind-driven ventilation in a crop protection structure for the tropics[J]. Biosystems Engineering, 2001, 80(1): 99~107.
- 6 Boulard T, Baille A. Modeling of air exchange rate in greenhouse equipped with continuous roof vents[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 61(1): 37~48.
- 7 Boulard T, Feuilloley P, Kittas C. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(4): 249~266.
- 8 陈忠购. CFD 在机械通风的华北型连栋塑料温室的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- 9 Versteeg H K, Malalaker W. An introduction to computation fluid dynamics[M]. London: Longman, 1995.
- 10 宋勇, 艾宴清, 梁波, 等. 精通 ANSYS 7.0 有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(4) 可以看出 $f_1(\mathbf{X})$ 与 $f_2(\mathbf{X})$ 之间是独立的, $f_3(\mathbf{X})$ 与 $f_2(\mathbf{X})$ 是准耦合的。 $f_1(\mathbf{X})$ 和 $f_2(\mathbf{X})$ 可以并行优化, 但 $f_1(\mathbf{X})$ 组的约束 g_2 和 $f_2(\mathbf{X})$ 组的约束 g_8 与 $f_3(\mathbf{X})$ 中的设计变量 x_3 有关, 因此在优化这两个目标时, 要先给 x_3 赋初值固定。而在优化 $f_3(\mathbf{X})$ 时, 需将 x_1, x_2, x_5 赋前面所得的优化值固定。

继续进行下一次循环, 直至满足收敛准则, 求出最优解。

优化计算结果与一般采用基于加权理想点法的

优化及初始结构的设计尺寸比较见表4, 这里的加权因子分别为 $w_1=0.5, w_2=0.5, w_3=0.01$ 。根据计算的过程和结果可知, 一般的加权优化随着加权因子的不同优化结果会产生变化, 因此各个优化目标是很难权衡的。而基于公理设计的优化是按次序进行的, 其优化结果是比较令人满意的, 除了第3个目标值有点偏大外, 其余两个目标值相比之下较小, 这也与前两个目标的重要程度相一致。

表4 优化结果

Tab. 4 Results of optimization

方法	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	x_6/MPa	t/s	a/mm	$T/^\circ\text{C}$
初始	100	60	280	40	5	3	7.241 0	5	378.937 6
加权优化	100.015 9	60.036 1	280.144 9	40.077 4	7.272 1	3.516 3	6.153 0	7.272 1	207.483 9
本文优化	100.052 7	60.121 4	300	40.257 8	5.847 8	4.726 5	4.535 1	5.847 8	224.996 9

4 结束语

公理设计理论旨在为产品设计的合理性提供判别准则和科学依据, 提供了一种自顶向下设计思路; 而优化设计通过确定合适的设计变量以使设计达到最优的性能, 它是一个很具体的过程, 在公理设计概

念中处在从功能要求到设计参数的映射中的低层。基于公理设计的思想, 通过分析设计变量对设计目标的影响程度来对设计参数进行分组, 避免了多个设计目标之间的反复权衡。将该方法应用到盘式制动器的优化设计中, 计算结果表明, 提出的基于公理设计的优化方法是一种较为实用的方法。

参 考 文 献

- 1 Suh N P. Axiomatic design: advances and applications [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- 2 Liu X P, Soderborg N. Improving an existing design based on axiomatic design principles [C]. First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, 2000.
- 3 Hwang K H, Lee K W, Park G J, et al. Robust design of the vibratory gyroscope with unbalanced inner torsion gimbal using axiomatic design [C]. Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, 2002.
- 4 黄洪钟, 姚新胜, 周仲荣. 基于满意度原理的装载机工作装置的多目标优化设计 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 97~103.
- 5 Chen K Z. Identifying the relationship among design methods—key to successful applications and developments of design methods [J]. Journal of Engineering Design, 1999, 10(2): 125~141.
- 6 秦力一, 许得刚. 混合法多目标优化盘式制动器 [J]. 机械设计与制造工程, 2002, 31(3): 17~18.
- 7 刘惟信. 机械最优化设计 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 1994.

(上接第116页)

- 11 陈忠购, 张天柱. 计算流体力学在温室研究领域的应用 [J]. 农村实用工程技术, 2004(6): 56~57.
- 12 Bartzanas T, Boulard T, Kittas C. Numerical simulation of airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped insect-proof screen in the openings [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1~3): 207~221.
- 13 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.