

尖顶型温室风压数值模拟与研究^①

颜菲尔, 李伟清

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 设施农业是高度现代化与集约化的新型农业生产方式, 作为设施农业中最高效、应用最广的温室, 其结构安全及室内指标测量与控制是当前的研究方向. 风荷载是引起温室结构破坏的主要自然成因, 因其受制于主导风向而且分布随机, 作用效应与温室结构形体、表面粗糙度等因素密切相关, 是一种复杂的结构动荷载. 为研究不同风向风荷载(0° 、 30° 、 60° 、 90°)对不同跨数(1 跨、3 跨、5 跨、10 跨)的温室结构直面风压的作用效应, 运用 ICFMCFD 及 Fluent 软件进行数值模拟实验. 结果表明: 风力和风向角相同时, 1 跨结构压力最大, 其余 3 种跨度风压相对较小且差异性不显著; 斜向来的风向是对温室结构最不利的情况, 而且 30° 和 60° 风向角形成的局部高压比 0° 和 90° 明显增大.

关键词: 尖顶型温室; 风荷载; 风压系数; Fluent; ICFMCFD; 数值模拟

中图分类号: TU261

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)02-0127-06

温室具有反季蔬菜供应、易于集约化生产、优化农业产业结构、协调农耕地与城市人口激增用地的矛盾的特点, 成为了现代农业生产中的主体^[1-4]. 研究表明, 我国温室面积达 15.67 万 hm^2 , 占世界的 42.8%, 位居世界第一^[5]. 由于温室大棚众多, 温室结构安全对设施农业的重要性不言而喻. 国内外学者通过对温室结构的安全性模拟研究发现, 风灾是引起温室结构破坏的主要自然因素^[6]. 风荷载对温室的破坏首先从温室表面维护体系开始, 并且不同形式屋顶、跨度及主导风向风荷载对温室的影响也各不相同, 有必要对不同跨数的温室的风荷载特性进行研究. 针对该问题, 运用 CAD 和 ICFMCFD 软件建立尖顶型温室的分析模型, 使用 FUENT 软件模拟不同主导风向下的大气边界层风荷载对结构的影响^[7].

1 国内外温室发展概况与风工程在温室中的运用

在欧洲、北美以及日本等发达国家的研究者对温室环境调控进行了深入研究^[8], 形成了成熟的温室栽培技术. 我国作为农业大国, 是温室起源最早的国家之一, 经过几十年的探索研究, 成功研制出了多种适合我国环境的温室类型和配套设施, 并逐步向规模化、集约化和科学化方向发展^[9], 温室及配套设备的质量和技术水平有了大幅度提高. 目前, 我国温室保温材料多采用常规塑料薄膜, 温室结构简单, 规模较小, 许多温室的形式和结构都是直接建造, 没有经过相应的科学设计与计算, 浪费材料而且其安全性无法得到保证.

在温室得到广泛的运用和发展时, 风灾对温室的危害造成的经济损失也越来越大, 温室的结构安全日

① 收稿日期: 2015-10-27

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(yjg132014).

作者简介: 颜菲尔(1991-), 女, 重庆九龙坡人, 硕士研究生, 主要从事农业建筑研究.

通信作者: 李伟清, 副教授, 硕士生导师.

益受到重视^[10-14]。衡量温室风荷载作用下结构安全性能的指标主要有两类：一是温室在局部正面峰值风荷载产生的压力或侧面吸力作用下失效概率；二是温室外围整体风荷载取值合理与否。结构风工程是一门综合计算流体力学(CFD)以及有限元,运用理论分析、数值计算、现场实测、风洞试验等方法,研究风与结构之间相互作用(尤其是动力风效应)的有力理论^[15-16]，基于此,文章利用该理论,模拟研究不同风向荷载对不同跨数的温室结构的影响^[17]。

2 风工程的数值计算与 CFD

风荷载作用下的实际工程问题是非常复杂的,并且不易进行现场试验,即使采用风洞试验等方式,成本也是异常昂贵的,而数值模拟与计算精读满足工程要求,且成本极低,决定了它在流体运动规律研究中的核心地位。风工程数值计算方法主要有两种：一种是基于 Euler 场的数值模拟离散模型方程法,另一种是追踪流体质点运动 Lagrange 法。

一切流体运动规律都是符合质量守恒定律的。对于一定流动空间,流体流入量与流出量一般是不相等的,其差值为该空间流体质量的积累(或增量)。据此,根据直角坐标系下的奥—高微分公式,可得出 V 为控制体 A 为控制面流体的连续性方程即质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

引入矢量符号：

$$\nabla \cdot \alpha = \text{div}(\alpha) = \frac{\partial \alpha_x}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_y}{\partial y} + \frac{\partial \alpha_z}{\partial z} \quad (2)$$

连续性方程可简写成：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3)$$

在流体系统中,流体在流动遵守动量守恒定律,即作用于控制体的总力矩等于控制面净输入的动量矩流量与控制体内瞬间动量矩的变化率之和。其微分形式的动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_{bx} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_{by} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_{bz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ρ 是流体空间内压强张力的分量, F 是空间直角坐标系 3 个方向上的单位质量流体的分量。由于我们研究对像是气体,则其需要考虑其相对运动方程。绝对速度 v_a 为相对速度 v_r 及牵连速度 v_e 之和,即：

$$v_a = v_r + v_e \quad (5)$$

式中, $v_e = v_0 + \theta \times r$, v_0 为平动速度, θ 为转动角速度, r 为质点矢径。又因为：

$$a_a = a_r + a_e + a_c \quad (6)$$

a_a 为绝对加速度, a_e 为牵连加速度, a_r 为相对加速度, a_c 为科氏加速度。其中,

$$a_e = \frac{dv_0}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \times r + \theta \times (\theta \times r), a_c = 2\theta \times v_r \quad (7)$$

综合以上方程可推导出流体的相对运动方程：

$$\rho \frac{d^2 r}{dt^2} + \text{div} P - a_c - 2\theta \times v_r \quad (8)$$

CFD 技术具有定量、动态地描述流体在不同环境下的作用过程,接近结构体在流体环境下的真实工作

情况的优势, 得到了日益广泛的应用. FLUENT 作为 CFD 技术中功能最强、应用最广的流体分析软件, 可进行层流、湍流的多维空间分析, 并且计算精度、稳定性和速度等性能较佳, 文章运用 FLUENT 技术进行尖顶温室不同风向作用下研究, 其基本计算原理如图 1 所示:

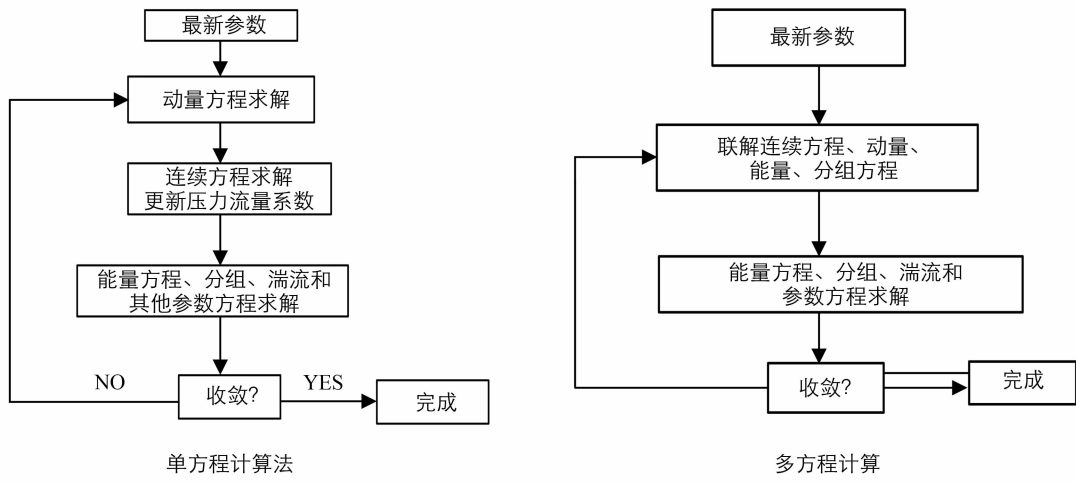


图 1 计算原理

3 尖顶型温室建模与 CFD 数值模拟

本文运用 CAD 及 ICEMCFD 软件, 建立单跨 6 m, 纵向长 30 m, 脊高 4.5 m, 不同跨度(1,3,5,10 跨)的尖顶型温室数值模型, 并将模型导入 FLUENT 软件, 进行 4 种风向角(0°,30°,60°,90°)风荷载作用下的模拟分析, 其主要过程如图 2 所示:

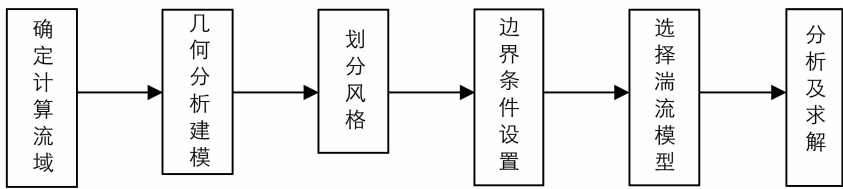


图 2 CFD 模拟分析流程

3.1 网格设置与计算域

在风工程数值建模中, 选择恰当的计算域至关重要. 计算域过大虽能够在小范围内提高精度, 但计算量会大大增加, 而过小会发生干涉影响. 为确定计算域的大小, 在数值模拟中, 我们通常采用阻塞率来衡量:

$$\text{阻塞率} = \frac{\text{建筑物最大迎风面面积 } A_b}{\text{流域横截面面积 } A_d}$$

(9)

对模型进行三维流场模拟测试显示, 结果对计算域敏感度极低, 上游为 4~5 倍的研究模型高度. 修正计算域的长 L 宽 W 高 H 分别为温室模型的 10 倍长、9 倍宽、5 倍高, 并将模型设置在流域前端 1/3 处, 计算域的设置应 $\leq 3\%$, 借此尽可能消除计算域设置对温室模型影响.

网格划分是 CFD 数值分析中的重要环节, 关系到计算结果的准确性和精确性, 鉴于本温室模型规整度高, 故采用非结构化方式离散模型, 并增加模型表面附近区域网格密度. 第一层加密网格为 0.1 m, 并逐层加密网格为相邻前一层的 1.2 倍, 边界层加密区为 0.75 m. 由于跨数不同, 网格数目也不同. 1 跨网格数目约 48.8 万个, 3 跨约 98.1 万个, 5 跨和 10 跨分别约为 141.2 万个和 180.8 万个, 网格划分如图 3 和图 4 所示.

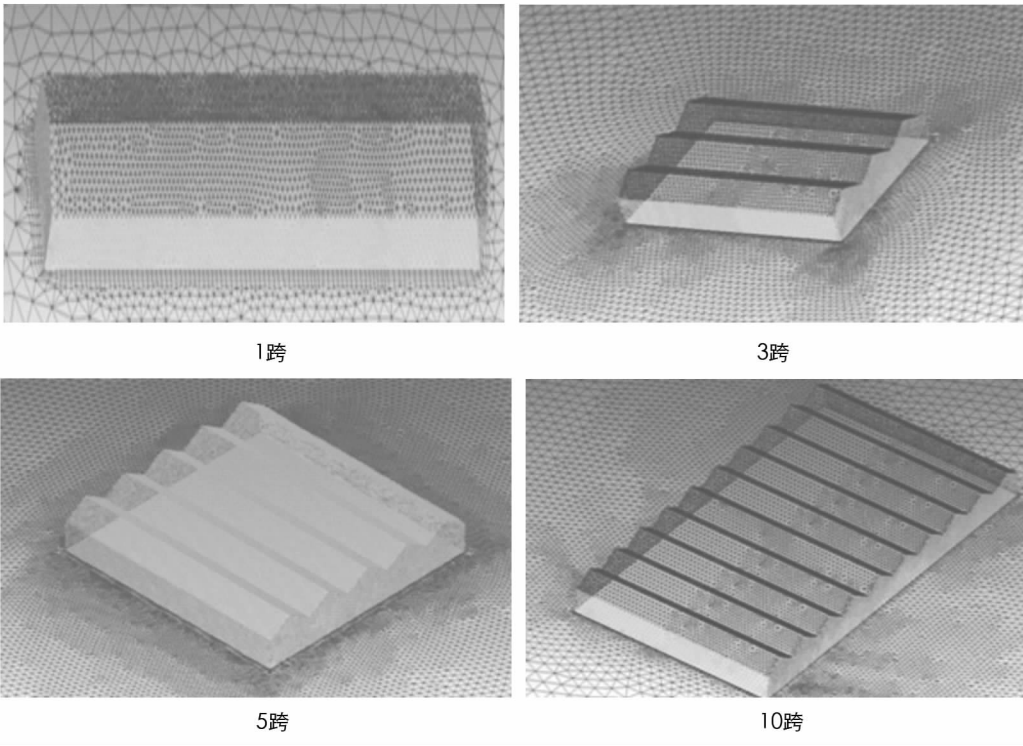


图 3 不同跨度的尖顶型温室 CFD 网格划分

3.2 边界条件的设置

边界条件的设置是应用 CFD 数值模拟的另一个重要条件。本文选用 k -epsilon 模型的耗散率及湍动能方程(8~9)，根据 Near-Wall Treatment 采用的 Non-Equilibrium Wall Functions 对边界进行处理计算。在模型进流面模拟进程前，设定速度入口进流的边界条件，利用指数率对大气边界层进行风剖面模拟。

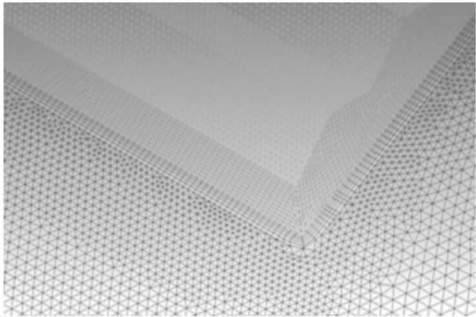


图 4 尖顶型温室局部网格划分图示

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon}) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{10}$$

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \tag{11}$$

式中， G_K 表征平均速度梯度引起的湍动能； $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 表示湍流粘性系数。

迭代收敛控制条件为所有变量的残差降到 10^{-4} 以下。

4 结果分析

研究采用极值风荷载压力系数表征尖顶型温室表面的风压分布。为探索不通风向角风荷载对温室表面风压的影响，分别就 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 风向角作用下，对不同跨数(1,3,5,10)尖顶型温室表面压力系数影响进行研究，分析结果见表 1。

当风荷载风向角为 0° 时，垂直于温室迎风面为正值，背风面、侧面和屋顶为负值，极值 -1.52 ，其中，1 跨正风压系数最大，其后压力随跨度增大而增大。当风向角为 30° 时，为斜风来流，比垂直风向更为不利，

尖顶温室所受正负压力较大, 不同跨度之间的压力变化趋势与 0°时相同; 当风向角为 60°斜风来流时, 温室所受压力比 30°时也有所增大, 其不同跨度之间的变化趋势与 0°时相同; 风向角为 90°时, 风与温室相切, 此时温室所受压力较风向角为 0°时大, 但比斜向来流时压力小, 不同跨度之间的压力变化趋势与 0°时相同.

可见, 当风方向和温室迎风面相垂直或相切时, 温室所受状况较之斜向来流时要好, 此时呈柱状涡形式流动分布并且分离的同时产生脱落. 当风向角为 30°及 60°时, 温室屋面来流直接接触的转角后方形成了局部高负压区域, 由此可以说明斜向来流是对尖顶形温室产生了最不利的来流情况.

表 1 不同风向角作用下不同跨度的尖顶型温室表面压力系数

跨度数	0°风向角		30°风向角		60°风向角		90°风向角	
	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
	风压系数 (+)	风压系数 (-)	风压系数 (+)	风压系数 (-)	风压系数 (+)	风压系数 (-)	风压系数 (+)	风压系数 (-)
1 跨	0.82	-1.42	0.93	-1.96	0.95	-1.98	0.84	-1.69
3 跨	0.73	-1.08	0.82	-1.33	0.81	-1.42	0.8	-1.41
5 跨	0.75	-1.32	0.86	-1.49	0.85	-1.61	0.81	-1.60
10 跨	0.77	-1.52	0.91	-1.87	0.90	-1.93	0.84	-1.62

5 结论及建议

通过对尖顶型温室在不同风向角作用与不同跨数下进行 CFD 数值计算, 发现斜风来流对温室的影响最大, 而且 60°方向来流比 30°方向来流对尖顶温室造成的压力更大. 单跨温室不管正压负压都是最大值情况, 所以在实际生产建筑时建议建造跨数为 3~5 跨之间的温室. 同时, 建造温室时, 还应考虑主导风向, 避免产生不必要的风灾. 研究还可以为不同温室屋顶形式(如圆拱型温室、Venlo 型温室)的研究提供参考.

参考文献:

[1] 杜艳艳. 国内外设施农业技术研究进展与发展趋势 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(4): 346—349, 368.

[2] 张晓文. 设施农业的发展现状与展望 [J]. 农机推广与安全, 2006(11): 6—8.

[3] 周长吉. 中国温室的发展与标准化进程 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊 1): 88—91.

[4] 周长吉. 现代温室工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[5] 葛志军, 傅理. 国内外温室产业发展现状与研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15751—15753.

[6] 梁宗敏. 连栋温室结构抗风可靠度设计理论研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.

[7] 郭万东, 徐泳, 张天柱. 温室结构风压的 CFD 模拟 [J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 56—59.

[8] LAUNDER B E, SPALDING D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows [J]. Computer methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269—289.

[9] 刘志良, 宁书臣, 勾贺明. 浅谈我国温室现状和发展趋势 [C]//中国农业机械学会. 中国农业机械学会第六届青年学术年会论文集. 河南洛阳: 2011: 204—207.

[10] 周长吉. 大型连栋温室设计风雪荷载分级标准初探 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 103—105.

[11] 杨再强, 张波, 薛晓萍, 等. 设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律 [J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7730—7736.

[12] 蒋明. 复杂双塔结构风荷载数值模拟 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[13] 胡渭雄. 典型空间结构气动形态与风压分布研究 [D]. 上海: 同济大学, 2009.

[14] 张远君. 流体力学大全 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991: 6—83.

[15] 金玲, 刘妍华. CFD 在温室室内环境研究中的应用 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(7): 4416—4418.

[16] 项海帆. 结构风工程研究的现状和展望 [J]. 振动工程学报, 1997, 10(3): 258—263.

- [17] 蔡唯益, 袁 军, 乔 克, 等. 圆拱型温室风压数值模拟与研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2014, 39(10): 92—95.

On Wind Pressure on Greenhouses with a Pointed Roof with Numerical Simulation

YAN Fei-er, LI Wei-qing

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Protected agriculture is a highly modernized and intensive mode of agricultural production and greenhouses are the most effective and most widely used facilities in protected agriculture. In the current research, we often looks at the structural stability of greenhouses as well as the measurement and control of indicators of greenhouses' interior conditions. Wind load, the main natural cause of structural damage to greenhouses, is a complex dynamic load on this structure because it is subject to prevailing wind direction and is distributed randomly and wind effects are closely related to the shape and surface roughness of a greenhouse and some other factors. In this study, a numerical simulation has been conducted by means of ICEMCFD and Fluent to investigate the effects of winds from different directions (0° , 30° , 60° , and 90°) on the walls of greenhouses with different numbers of spans (1, 3, 5, and 10 spans). Results show that, under the winds with the same wind strengths and from the same directions, the single-span greenhouse is subjected to the highest structural pressure while the other three structures underwent relatively low and similar pressures. Moreover, oblique winds are the most unfavorable conditions to the greenhouses and the winds from the directions of 30° and 60° caused significantly higher local negative pressures than the winds from the directions of 0° and 90° did.

Key words: greenhouses with a pointed roof; wind load; coefficient of wind pressure; Fluent; ICEMCFD; numerical simulation

责任编辑 汤振金