

温室结构风压的 CFD 模拟

郭万东¹ 徐泳¹ 张天柱²

(1. 中国农业大学 理学院,北京 100083; 2. 中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)软件 CFX-5,采用湍流 $k-\epsilon$ 模型和结构化非均匀网格对华南型单栋塑料温室的表面风压进行了数值模拟,预测出温室表面的风压分布,并讨论了温室屋檐和屋脊处的风压分布特点。与他人风洞试验结果进行比较结果表明,数值模拟和风洞实验的风压分布趋势相近,风压数值基本吻合。对连栋温室的表面风压进行了模拟,得到了表面风压的分布特征,并发现边缘栋的风压较大,在结构设计时应该重视;在连栋数大于 3 栋的情况下,中间各栋温室的表面风压比较一致。CFD 方法能定性和定量地预测出温室表面的风压分布。

关键词 温室; 风压; CFD 方法; 湍流; $k-\epsilon$ 模型

中图分类号 TU 311.2; S 261

文章编号 1007-4333(2005)01-0056-04

文献标识码 A

CFD simulation of wind pressure on greenhouse structure

Guo Wandong¹, Xu Yong¹, Zhang Tianzhu²

(1. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

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

Abstract A numerical simulation was carried out for wind load acting on the Southern China type single-span greenhouse utilizing the CFD software CFX-5 with turbulent $k-\epsilon$ model and structured meshing, and predicted the wind pressure distribution on the surface of greenhouse, the characteristics of wind pressure distribution on the eaves and ridges of greenhouse was discussed. Comparison between the simulated results and that of wind tunnel experimental test by others shows that the trends of wind pressure distributions are similar and the corresponding pressure values are in general coincidence, suggesting that CFD technique can predict the wind pressure distribution successfully therefore it provides a powerful tool for simulating various load features both qualitatively and quantitatively. Furthermore, simulation of wind pressure distribution for a multi-span greenhouse was also studied, it shows that the marginal span endures much larger wind load whereas the middle ones endure less. Therefore attention should be taken for the marginal ones. When the number of spans is larger than 3 the wind loads on the middle ones are almost uniform.

Key words greenhouse; wind load; CFD(computational fluid dynamics); turbulence; $k-\epsilon$ model

用轻钢型材组装的温室建筑结构具有自重轻、刚度较小,在强风作用下易破坏等特点。因多为细长杆,发生屈曲的可能性更大,故温室表面风压的准确取值对温室结构的可靠性评估尤为重要。自 20 世纪 80 年代始,国外学者对温室结构风荷载进行了研究。Wells 和 Hoxey^[1]针对玻璃温室的风荷载取值做了全尺寸模型试验研究;Mathews 和 Meyer^[2]研究了半圆拱温室的风荷载取值,并建立了相应的数值模型。经济发达国家制定了温室结构设计标

准,如美国温室标准^[3]、欧洲温室标准^[4]和日本园艺设施标准^[5],促进了温室结构设计的规范化和标准化进程。近年来国内也有学者对温室结构风、雪荷载的取值和分级进行了研究。周长吉^[6]根据我国不同地域的气候特点研究了连栋温室结构的风、雪荷载取值以及不同气候区域的风、雪荷载分级;谢小妍等^[7]对华南型单栋塑料温室风荷载做了风洞试验;孙德发^[8]综述了各国对温室结构的风荷载取值并对其合理性进行了探讨。

收稿日期: 2003-11-14

基金项目: 国家十五科技攻关计划资助项目(2001BA503D01); 国家农业科技成果转化基金资助项目(02EFN216901266)

作者简介: 郭万东, 硕士; 徐泳, 教授, 博士生导师, 主要从事散体力学、农业建筑工程的研究, E-mail: xuyong@cau.edu.cn

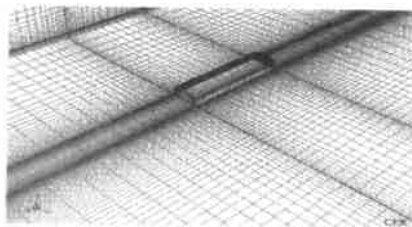
我国尚无温室设计规范可循,仍沿用工业民用建筑设计规范标准,更有不进行结构设计而随意建造者,其结果往往是安全性差或者造成材料浪费。确定一套适合我国自身气候特点的温室风荷载规范具有现实意义,而确定这套规范时首先要做的就是对温室表面风压数值及分布规律进行研究。

对温室结构风荷载的研究主要有现场实测、风洞试验和 CFD (computational fluid dynamics) 数值模拟。现场实测无疑是最直接和可靠的研究方法,但气象条件瞬时多变,很难全天候地连续采集所有的风压数据,而只能把有限次强风下有限个测点的结果作为分析依据,且此方法无法在设计阶段进行操作;风洞试验弥补了这一缺陷,但小规模模型风洞试验结果不易准确,全尺度模型试验又耗费巨大。采用 CFD 方法模拟风场及风荷载则可避免以上缺点,具有成本低、速度快的优点,且便于设计前多方案、多工况分析比较和优化。

笔者采用 CFD 技术对华南型单栋塑料温室和连栋温室的表面风压进行了全尺度数值模拟,将模拟结果与风洞实验^[7]结果进行比较,以了解温室风压的分布特点,同时寻找到一种分析温室风压方便、快捷、准确有效的数值方法,为连栋温室的结构设计和优化提供技术参考。

1 华南型单栋温室表面风压的 CFD 模拟

华南型单栋塑料温室^[7]的外形尺寸一般为:长 42 m,跨度 8 m,屋脊高 4.0 m,侧檐高 2.5 m,屋檐外伸 0.3 m;采用型钢构件,覆盖材料为塑料薄膜,结构自重轻,永久荷载所占结构总荷载的比重较小,而风、雪荷载为结构的主要荷载。



(a) 计算域下表面



(b) 温室表面

图 1 计算域网格划分示意图

Fig. 1 Grid generated in the domain

1.2 边界条件处理

1) 来流边界条件。大气边界层中风的特性十分复杂,不同学者采用的来流条件不尽相同。本文中将来流视为大气边界层中均匀的充分发展湍流。取

1.1 控制方程及网格划分

根据大气边界层风的特性,把大气边界层简化为定常、不可压缩的湍流,采用标准 $k-\epsilon$ 方程湍流模型进行数值模拟。控制方程为三维定常不可压缩 N-S 方程。

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (2)$$

k 方程

$$u_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_k - \quad (3)$$

方程

$$u_j \frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_t}{k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{P_k}{k} - C_2 \frac{k^2}{k} \quad (4)$$

式中:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$P_k = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

式(1)~(6)中的模型常数分别为: $C_\mu = 0.09$, $k = 1.0$, $\epsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ 。

为了使模拟的流场可充分发展,根据经验^[9]取计算域为 160 m × 672 m × 48 m 的长方体,入口距离 48 m。因华南型温室带有屋檐,物理上是细长面,故采用结构化非均匀网格,在温室表面附近区域网格加密,在远场的网格划分较稀疏(图 1)。

流速为常用的指数风剖面,速度分量为:

$$\frac{u(y)}{u_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^{1/7}, \quad v = 0, \quad w = 0$$

其中: u, v, w 分别为 x, y, z 方向的平均速度分量;

$u(y)$ 为高度 y 处的平均风速; y_0 为参考高度, 取 $y_0 = 4 \text{ m}$, u_0 为参考高度处的平均风速, $u_0 = 11.0 \text{ m/s}$; α 为与地面粗糙度有关的指数, 按《建筑结构荷载规范》^[9]取 $\alpha = 0.16$ 。

入口处的湍动能和湍能耗散率按 Paterson 给出的公式

$$k = \frac{2(u^2 + v^2)}{[\ln(y/y_0)]^2 C_u^{1/2}}, \quad \epsilon = \frac{C_u^{3/4} k^{3/2}}{y}$$

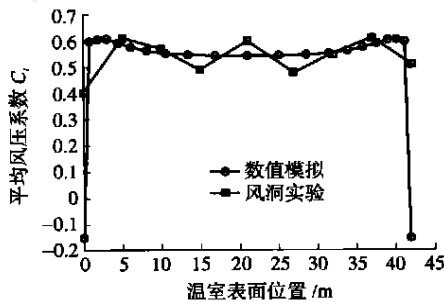
计算。其中: $C_u = 0.41$ 为卡门常数; y_0 为壁面的粗糙值, 对地面取 0.03 m ^[9], 温室壁面取 0 。

2) 出流边界条件。出流面边界条件采用相对平均压力边界条件, 相对平均压力为 $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ 。

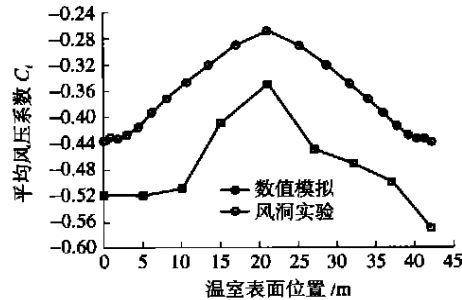
3) 侧面和上空面边界条件。侧面和上空面采用远边界条件, 即 $\frac{\partial P_s}{\partial x_i} = 0$, P_s 为远场的压力值, Pa。

1.3 计算结果及分析

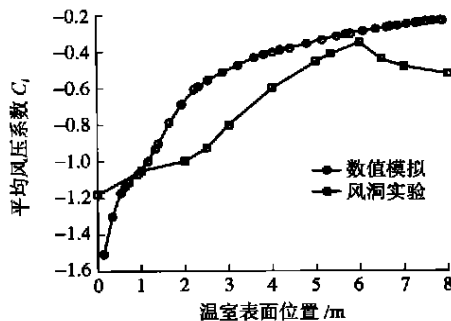
对模拟结果引进量纲 1 的平均风压系数^[7] C_i



(a) 迎风墙



(b) 背风墙



(c) 山墙

图2 华南型单栋温室表面风压分布图
(2.5 m 高处)

Fig.2 Wind pressure distribution on the greenhouse's wall (height is 2.5m)

2 连栋温室表面风压的 CFD 模拟

现今的连栋温室设计方法是以单栋温室为基本单元组织设计, 即把连栋温室看成由多个单栋温室单独设计后组装而成。仅就风荷载的选取设计来看, 连栋温室与单栋温室由于结构外形存在很大差别, 其风荷载效应必然有所不同, 针对这些情况, 研

究连栋温室表面风压的分布规律也是很有必要的。来表示。温室表面风压分布见图 2。由图 2(a) 和 (b) 可以看出: 2.5 m 高处温室迎风墙和背风墙表面风压的模拟值与风洞实验值总体趋势一致, 在迎风墙处大部分区域以正压力存在, 背风墙区域以负压 (吸力) 存在。模拟结果在整个迎风墙范围内比较稳定, 而实验结果存在波动, 但二者的均值基本一致; 在迎风墙与山墙相交的小部分区域模拟结果有较大幅值的跳跃, 出现负压 (吸力), 而实验结果没有表现出来这种现象; 在背风墙处模拟结果较实验结果平均小 0.1, 存在一定的差别。

从图 2(c) 可以看出, 在山墙 2.5 m 高处的风压为负压, 模拟结果与实验结果分布趋势相同, 风压从迎风墙处到背风墙处逐渐减小。模拟结果和实验结果在迎风墙与山墙交界区域均出现山墙面风压的极大值, 但模拟结果的极大值较实验结果极大值偏大, 还可以发现在山墙的后半部分, 风洞实验结果有明显的负压回弹现象, 而模拟结果没有这种现在发生。

究连栋温室表面风压的分布规律也是很有必要的。

对连栋温室进行三维风荷载 CFD 模拟。来流方向与连栋温室山墙墙面平行, 温室采用多个单栋温室单元组装而成, 其中单元尺寸与华南型温室尺寸相同, 数据处理仍采用谢晓妍^[7]的方法。连栋温室表面风压分布见图 3。

由图 3(a) 可以看出, 中截面处温室表面风压的

分布是,在迎风墙处风荷载为正压,背风墙处为负压,屋面处风压呈正-负压交替分布。风压的正负压极值均出现在靠近入流面的边缘栋处。还可看出,在第一栋温室的风压分布与单栋温室的风压分布规律一致,但风压的极值较单栋时的大;在靠近出流面的边缘栋处,屋脊处的负压值高于中间栋温室表面的风压值。

中间栋温室的风压分布见图 3(b)。可见,中间

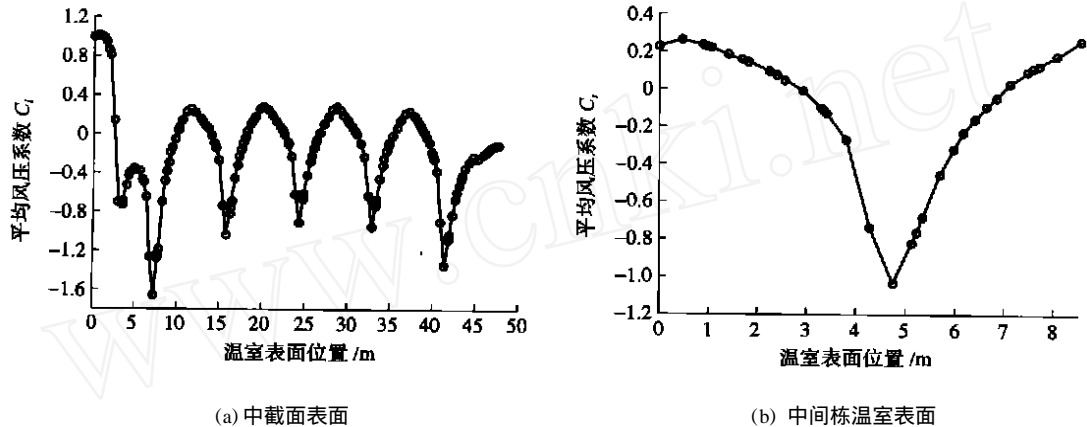


图 3 连栋温室表面风压分布图

Fig. 3 Wind pressure distribution in multi-span greenhouse

3 结 论

对华南型单栋塑料温室风压的数值模拟结果与实验结果比较分析表明:CFD 方法能够定性和定量地预测温室表面风压的分布规律,从而为研究温室风荷载提供了有效的技术手段。连栋温室表面风压的数值模拟结果表明:边缘栋的表面风压分布规律相对较复杂,当连栋数超过 3 栋时,中间栋风压的分布规律与边缘栋不同,其风压系数的分布范围为 -1.0~0.3,小于边缘栋的 -1.6~1.0,因此在进行结构设计时,应以考虑分别处理。

参 考 文 献

[1] Wells D A, Hoxey P R. Measurements of wind loads on full-scale glasshouses[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1980, 6(1-2):139-167
 [2] Mathews E H, Meyer J P. Computation of wind loads on

栋表面风压大体以屋脊为轴呈对称分布,即在靠近入流面的迎风坡屋面和背风坡屋面的风荷载规律和取值基本相同,在屋脊边缘背风坡屋面上出现风压的负最大值,在 2 个温室单元的连接部位即天沟处出现正压最大值。同时发现,当连栋数超过 3 时,中间栋的风压分布与边缘栋不同,其风压值分布范围为 -1.0~0.3,而边缘栋的为 -1.6~1.0,因此在进行连栋温室结构设计时,应考虑局部加强处理。

a semicircular greenhouse[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, 1988, 29(1-2):225-233
 [3] 美国温室制造业协会. 周长吉等译. 温室设计标准[M]. 北京:中国农业出版社, 1998:6-12
 [4] Elsner B V. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in European Union countries: part 1, Design Requirements[J]. J Agric Engng Res, 2000(75):1-6
 [5] 日本设施园艺协会. 设施园艺结构安全标准[S]. 叶淑娟译. 北京:农业出版社, 1989:5-16
 [6] 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
 [7] 谢小妍,陈凯. 华南型单栋塑料温室风荷载模拟实验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5):90-94
 [8] 孙德发. 连栋温室结构设计中动态风压取值方法初探[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1):93-95
 [9] 中华人民共和国建设部. GB50009-2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002