

不同屋面坡度温室表面风压的数值模拟

雷隽卿 李保明

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 探讨双坡面温室屋面坡度对温室结构表面风压分布的影响。基于标准 k -模型方程和壁面函数法,采用有限元方法对温室结构模型进行离散,利用有限元分析软件 ANSYS 对不同坡度的双坡面温室表面风压进行数值模拟,对得到的风压分布曲线进行分析。结果表明:当屋面坡度由 0°增加到 30°时,迎风屋面的风压(风吸力)系数由 0.62 减小到 0.15,背风屋面风压系数由 0.58 增大到 0.66。由于屋面风吸力过大是导致屋面破坏的主要原因,推荐温室屋面坡度采用 20°~30°,此时迎风屋面的风压系数(0.28~0.15)及背风屋面的风压系数(0.64~0.66)均较小,满足温室生产及通风要求。

关键词 双坡面温室;屋面坡度;风压系数;有限元;数值模拟

中图分类号 TU 312.1

文章编号 1007-4333(2007)06-0093-04

文献标识码 A

Numerical simulation of wind pressure on greenhouses with different roof pitches

Lei Junqing, Li Baoming

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

Abstract To study the influence of different roof pitches on the wind pressure of the surface of greenhouses with double-pitch roof, based on turbulence k -model and wall function method, greenhouse structures were dispersed by member FEM. The wind pressure on greenhouse structures of different roof pitches was simulated by using the FEM analysis software—ANSYS, the wind pressure distributing curves were obtained and the rule of wind pressure coefficient with roof pitch was summarized. Through the simulations and analysis, the result showed that the windward roof pressure coefficient decrease from 0.62 to 0.15 while that of the leeward roof pressure increase from 0.58 to 0.74 according to the increase of roof pitch. The main reason of greenhouse roof breakage was bigger wind suction. The recommended roof pitches were between 20° to 30°, because the wind pressure on both of the windward roof and the leeward roof were smaller, the need of operation and ventilation could also be contented.

Key words greenhouses with double-pitch roof; roof pitch; coefficient of wind pressure; finite element method (FEM); numerical simulation

温室结构自重轻,刚度小,结构构件截面尺寸较小,风荷载是其主要活荷载,抗风设计是结构设计的重要内容。GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[1]中对工业与民用建筑中的风荷载定义及取值有明确规定,但对农业建筑中的温室,尚无系统专门的规范标准可循。目前,我国温室结构风荷载计算主要参照《建筑结构荷载规范》^[1]和国外有关标准^[2],在可

靠度、荷载重现期、风速取值高度和时距等方面缺乏统一性和针对性。对近几年在强台风^[3]作用下发生破坏的温室进行灾后实地调查表明,大多数结构屋面受损严重,破坏多发生在屋面转角、边缘和屋脊等部位,说明屋面与主体结构相比更易产生风导致的破坏。因此,研究温室结构屋面坡度对结构表面风压分布的影响,分析结构抗风关键部位的风压对温

收稿日期:2007-06-05

基金项目:北京市教育委员会都市农业学科群建设项目(XK100190553)

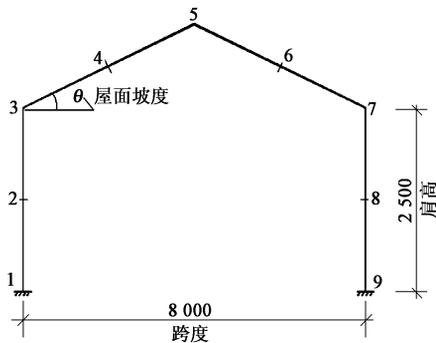
作者简介:雷隽卿,博士研究生,E-mail:ljq@cau.edu.cn;李保明,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail:libm@cau.edu.cn

室抗风设计具有重要意义。

国内外对高耸或低层民用建筑结构风荷载的研究较多^[4-6],但温室结构与民用建筑结构特点不同,因此风荷载计算不能简单套用民用建筑的研究结果。目前对温室结构风荷载的研究主要借助于风洞模型试验^[7]和全尺寸现场实测,但风洞模型试验存在诸如缩小尺寸的模型与实际结构周围风场的差异以及对风的复杂湍流结构、绕流脉动和高雷诺数的模拟困难等问题;另外,无论是风洞试验还是全尺寸实测均存在测试费用大、周期长及精度易受测试手段和仪器误差的影响等问题。20世纪80年代以来,随着计算机技术的飞速发展,利用计算机对建筑风场进行数值模拟成为预测建筑物风效应新的有效方法^[8-9]。本研究拟采用 ANSYS 软件对不同坡度双坡面温室结构表面风压进行数值模拟,研究屋面坡度与结构表面风压的关系,探索双坡面温室表面风压分布的规律和特征,以期能为温室结构抗风设计提供风荷载计算依据。

1 基本方程

本研究采用二维方法处理温室结构,即取单栋温室中间一榀框架(图1)作为分析单元,只研究正面来流情况下温室表面的风压分布,从而在保证分析精度的前提下,提高数值模拟效率。计算中假定温室表面覆盖材料为刚性材料。



1、2、3、4为迎风面的柱底、柱中点、屋檐及屋面中点,5为屋脊,6、7、8、9为背风屋面的中点、屋檐、柱中点及柱底。单位:mm,下同。

图1 双坡屋面温室计算模型

Fig.1 Simplified model of double-pitch roof greenhouse

将大气边界层视为稳态、黏性、不可压缩湍流流体,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程、 k 方程和 ϵ 方程,其通用形式为^[10]:

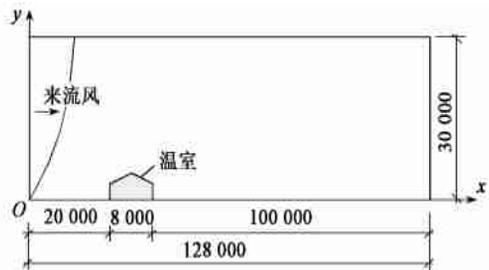
$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\text{grad} \phi) + S \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ϕ 为通用变量,分别表示 x 、 y 、 z 方向的风速 u 、 v 、 w 等求解变量, m/s ; t 为时间, s ; S 为广义源项,对应不同的控制方程其表达式不同^[10]; Γ 为广义扩散系数。式(1)中涉及到的系数的取值目前已比较一致^[11],分别为: $c_1 = 1.44$ 、 $c_2 = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 和 $k = 1.0$ 、 $\epsilon = 1.3$ 、 $\tau = 0.9 \sim 1.0$ 。

2 计算模型及边界条件

本研究中采用 ANSYS 建模时建立了3个区域:1)温室;2)温室周围要求网格变形的流体区域;3)其余的流体区域。模拟区流场为充分发展流场。网格划分时,在温室近壁和近地面的区域进行网格加密。

温室计算模型见图1。整个计算区域为:进口边界在温室上游20m处,出口边界在温室下游100m处,上空面取距地面30m处(图2)。



流场入口边界与地面交点为坐标原点,温室结构跨度方向为 x 轴,高度方向为 y 轴。

图2 流体-温室数值模拟计算区域

Fig.2 Analysis region of fluid-greenhouse in simulation

温室主要杆件基本参数见表1。建模时,流体采用 Fluid 141 单元,结构采用 Beam 3 单元和 Link 1 单元。

数值模拟中,来流风沿高度方向按照指数规律分布,参考高度($z_b = 10 \text{ m}$)处的平均风速为 26.832 m/s 。本研究采用的边界条件如下。

1) 来流边界条件:采用指数律表示风速沿高度的变化规律;

2) 入口处的湍流动能 k 和湍流动能耗散率 用 Paterson^[12] 给的公式计算

$$k = \frac{2(u^2 + v^2)}{[\ln(y/y_0)]^2 C_\mu^{1/2}} \quad (2)$$

$$= \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{y} \quad (3)$$

式中: $\kappa = 0.4$ 为卡门常数; u 和 v 为空气流动速度在

表 1 数值模拟温室主要杆件基本参数

Table 1 Parameters of greenhouse structure members in simulation

杆件	规格/mm	截面积/m ²	惯性矩/m ⁴	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa
柱	方钢管 50 ×50 ×2(外边长 ×外边长 ×厚度)	3.26 ×10 ⁻⁴	0.12 ×10 ⁻⁶	210	84
梁	圆管 32 ×2(外直径 ×厚度)	2.01 ×10 ⁻⁴	0.80 ×10 ⁻⁹	210	84

x(垂直壁面)和 y(平行壁面)方向的分量; y₀ 为黏性底层与对数律层的分界点, y₀ = 11.5 m。

3) 出口边界条件: 目前使用最多的出口边界条件为, 假定流动在出口处已充分发展, 在流动方向上无梯度变化。本研究中定义 $\frac{\partial}{\partial x} = 0$, 其中, $(u, v, k,)^{[12]}$ 。

4) 壁面边界: 固体壁面上采用无移动条件, 即结构表面上取 $u = v = k = 0$, 在近壁区采用壁面函数。

5) 地面及上空面边界: 纵向速度 $v = 0$, 其他变量法向导数为 0, 即 $\frac{\partial}{\partial y} = 0$, 其中, $(u, v, k,)$ 。

6) 温室结构与地面连接: 底部固支。

计算中取泊松比 $\nu = 0.25$, 温室结构杆件的密度为 7 800 kg/m³。

3 不同屋面坡度温室表面风压的计算

3.1 数值模拟

为方便与《建筑结构荷载规范》中的风荷载体型系数(图 3)对比, 引入量纲 1 参数 C_p 对温室结构表面风压模拟结果进行处理

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho u_0^2 / 2} \quad (4)$$

式中: C_p 为模拟点的风压系数; (P - P₀) 为模拟点处风压值与远方上游参考高度处静压值之差, 即模拟点的净风压力; u₀ 为参考高度处的平均风速; ρ 为空气质量密度, ρ = 1.25 kg/m³。《建筑结构荷载规范》中风荷载体型系数也是依据式(4)给出的。

3.2 结果分析

1) 图 3 示出迎风面屋檐、屋脊、背风面屋檐处的风压系数随屋面坡度的变化曲线。可见, 迎风面屋檐处的风压随着坡度的增大而明显增大; 背风面屋檐的风吸力随坡度的增大缓慢增大, 当坡度为 20°、30° 时, 该处风吸力几乎保持不变; 屋面坡度由 0° 增大到 10° 时, 屋脊处的风压系数绝对值由 0.6 增加到 1.0; 然后, 随着屋面坡度增加, 风压系数绝对值略有减小。模拟结果与《建筑结构荷载规范》对比, 除迎

风面屋檐的模拟值比规范值小以外, 背风面屋檐和屋脊处的风压都比规范值大很多; 并且《建筑结构荷载规范》给出的屋脊及背风屋面的风压系数均未考虑坡度变化的影响, 与实际情况和风洞试验结果不符。

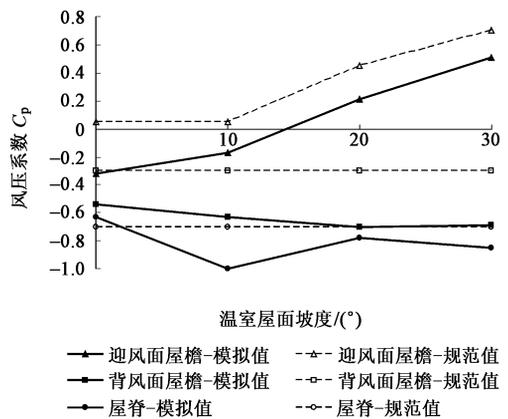
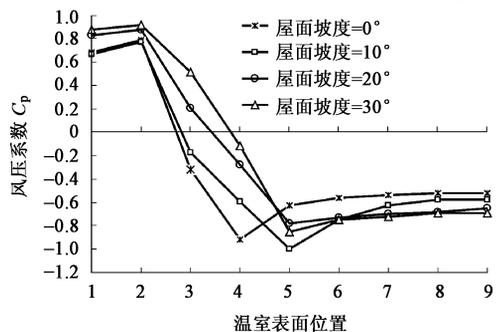


图 3 温室结构表面风压系数与屋面坡度的关系

Fig. 3 Relationship between wind pressure coefficient-roof pitch

2) 图 4 示出来流风垂直于迎风面墙, 屋面坡度分别为 0°、10°、20° 和 30° 时温室结构表面风压系数的分布情况。可以看出, 当屋面坡度较小(0°、10°) 时温室结构迎风面柱顶(位置 3) 出现风吸力, 屋面坡度较大(20°、30°) 时温室结构迎风面均为风压力; 迎风面屋面均为风吸力, 背风面屋面和墙面均为风吸力。



温室表面位置见图 1 标注。

图 4 不同屋面坡度下温室结构表面不同位置的风压系数

Fig. 4 Coefficient of wind pressure on greenhouse surface location with different roof pitch

3) 温室结构的迎风面风压变化较为显著,而背风面的风压变化则比较平缓(图4)。沿着温室结构迎风面柱底柱中位置,风压略有增大;由迎风面柱中位置直到屋脊,风压迅速减小,并由风压力变为风吸力;温室结构的背风面均为风吸力,由屋脊到背风面的柱底风吸力缓慢减小,并且逐渐趋于稳定。

综上,建议温室结构迎风屋面风荷载体型系数可采用规范给出的系数值,而背风屋面风荷载体型系数取-0.66。

3.3 结果验证

将本研究模拟值与文献[7]风洞试验值进行对比:温室结构表面风压系数模拟值与风洞试验值总体变化趋势一致,结构表面各点相应的数值范围大致吻合。迎风面,模拟计算得到的风压系数略大于风洞试验结果,误差约5%;背风面,模拟计算值略小于风洞试验结果,误差约15%。檐口、屋脊部位模拟风压系数较试验值小,误差为10%左右。

4 结论

1) 与《建筑结构荷载规范》比较,数值模拟得到的双坡面温室结构的表面风压值,除迎风面屋檐的风压值较小外,其他位置的风压都偏大,因此,温室防风设计不能直接按民用建筑的荷载规范进行。

2) 屋面坡度小于20°时,双坡屋面温室的屋面风压一般均表现为负压(吸力)。随着屋面坡度的增大,迎风屋面的风压绝对值趋于减小,背风屋面的趋于增大。从屋面防风设计的经济合理性考虑,屋面坡度宜推荐为20°~30°。

3) 双坡面温室屋面的屋檐、屋脊附近局部容易形成较高负压区,因此,进行温室防风设计时,必须进行屋面局部的风压验算,并采取足够的构造措施保证屋面连接的整体性,防止屋面局部出现风导致的结构失效。

4) 从工程应用角度,采用数值模拟方法预测双坡面温室结构的表面风压分布是可行的。该方法具有经济、实用的特点,且便于进行较系统的参数分析。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局.

GB 50009—2001 建筑结构荷载规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002:24~47

- [2] 美国温室制造业协会.美国温室制造业协会温室设计标准[M].周长吉,程勤阳,译.北京:中国农业出版社,1998:6~26
- [3] 薛根元,俞善贤,何风翩.云娜台风灾害特点与浙江省台风灾害初步研究[J].自然灾害学报,2006,15(4):39~47
- [4] Gregory A K, Chen Yingzhao. Database-assisted design of low-rise buildings: aerodynamic considerations for a practical interpolation scheme[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(6): 909~917
- [5] 付国宏. 低层房屋风荷载特性及抗台风设计研究[D].杭州:浙江大学,2002
- [6] Hoxey R P, Robertson A P. Pressure coefficients for low-rise building envelopes driven from full scale experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1994, 53:283~297
- [7] 谢小妍,陈斌.华南型单栋温室风荷载试验研究[J].农业工程学报,2000,16(5):90~94
- [8] Hoxey R P, Moran P. A full scale study of the geometric parameters that influence wind loads on low-rise buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13:277~288
- [9] Tamura T. Reliability on CFD estimation for wind structure interaction problems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 117~143
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004:26~145
- [11] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001:306~356
- [12] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Compute Methods Apply Mech Eng, 1974 (3):269~289
- [13] 张相庭. 结构风工程理论·规范·实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:178~184
- [14] 蒋秀根,剧锦三,张丽莉.考虑桁架刚度的温室结构风荷载效应分析方法[J].中国农业大学学报,2005,10(6):70~74
- [15] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M].上海:同济大学出版社,2001:12~43
- [16] 周长吉. 有立柱钢管骨架日光温室的结构优化[J].农业工程学报,1994,10(1):157~160