

## 温室结构风振效应的数值模拟

雷隽卿<sup>1</sup> 王东霞<sup>2</sup> 蒋秀根<sup>1</sup> 李保明<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100020)

**摘要** 根据大气边界层风的特性,利用 CFD 方法,采用 N-S 方程、湍流  $k-\epsilon$  模型及壁面函数法对空气湍流进行了数值模拟;采用有限元方法对温室结构模型进行离散,利用大型通用有限元分析软件 ANSYS,对脉动风下考虑流-固耦合的温室结构进行了数值模拟计算和分析。结果表明,脉动风作用下,结构最大位移为 0.21 m,与平均风压作用下的结构最大位移 0.007 4 m 相比显著增大。认为进行温室结构设计时,应考虑流-固耦合作用下的脉动风效应。

**关键词** 温室结构; 湍流; 脉动风; 流-固耦合

中图分类号 TU 311.2

文章编号 1007-4333(2007)04-0085-05

文献标识码 A

### Numerical analysis on wind vibration effect on greenhouse structures

Lei Junqing<sup>1</sup>, Wang Dongxia<sup>2</sup>, Jiang Xiugen<sup>1</sup>, Li Baoming<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China Railway Engineering Consultants Group, Beijing 100020, China)

**Abstract** According to the wind characteristics in the atmospheric boundary layer, turbulence was simulated in this paper by using the method of CFD, adopting N-S equation, turbulence  $k-\epsilon$  model, and wall function method. Greenhouse structures were dispersed by member FEM. The greenhouse structures considering fluid-structure interaction under the fluctuating wind were numerically simulated by using the commercial software-ANSYS. The results from the simulation proved that the maximal displacement of the structure due to wind vibration effect was 0.21 m and the increment was distinct compared with 0.007 4 m caused by normal wind. It was quite important to consider wind vibration effect and fluid-structure interaction to greenhouse structures.

**Key words** greenhouse structure; turbulence; fluctuating wind; fluid-structure interaction

风荷载是温室结构设计中考虑的主要荷载,尤其是作用于结构上的与风速方向一致的脉动风对温室结构产生的动力响应,因此对温室结构在使用阶段可能遇到的风荷载情况,以及由此产生的结构响应做出准确的估算,一直是温室结构设计中的重大问题。

近年来,国内外许多涉及温室结构工程设计的基本问题,如温室结构荷载的取值<sup>[1-4]</sup>、温室结构可靠度设计<sup>[5]</sup>、温室结构优化<sup>[6]</sup>等都已得到较好解决,但关于温室结构抗风设计的理论研究<sup>[7]</sup>开始较晚,特别是对于风荷载的动力效应问题,至今尚未有

成熟的解决方法。已有的研究大多集中在结构风荷载的静力等效,以及等效后的静力荷载作用于温室结构所产生的效应分析<sup>[8]</sup>,没有很好地结合温室结构的特点,进行风荷载动力效应的分析,从而可能导致:1)盲目加大钢材用量而造成不必要的浪费;2)由于没有全面合理地考虑各种可能出现的结构作用,而使结构存在某些未预见的隐患。为此,本研究利用通用大型计算软件 Ansys 对脉动风下温室结构的效应进行了计算和分析,分别研究了平均风作用下、脉动风作用下的结构效应,以及考虑流-固耦合的脉动风效应。

收稿日期: 2006-11-04

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; 蒋秀根,教授,通讯作者,主要从事结构工程方向的研究, E-mail: jiangxg@cau.edu.cn

# 1 数值模型

## 1.1 风流体模型

1) 流体模型。结构风工程中风荷载数值计算模型的核心是湍流作用下的钝体空气动力学,大气边界层中的风可简化为黏性、不可压缩的湍流<sup>[9]</sup>。黏性不可压缩流体运动满足 Navier-stokes 方程,计算湍流时选用  $k-\epsilon$  模型。

2) 风速剖面参数。建筑物所在地的近地风特性是进行其结构抗风计算的基本依据。通常将本质上是随机的风分解为平均风和脉动风。基本风压  $w_0$  和平均风速沿高度的变化规律根据我国《建筑结构荷载规范》<sup>[10]</sup>确定,风速剖面:

$$\frac{\bar{v}(z)}{v_b} = \left( \frac{z}{z_b} \right)^{0.16} \quad (1)$$

式中:  $z_b$  和  $v_b$  分别为参考高度(取 10 m)和参考高度处的平均风速(取 26.905 m/s);  $z$  和  $\bar{v}(z)$  分别为任一点的高度和该点处的平均风速; 0.16 为地面粗糙度影响指数,城市空旷地区的温室结构取  $\alpha = 0.16$ <sup>[10]</sup>。

3) 固体壁面模型。流体域的  $k-\epsilon$  模型适用于离开壁面一定距离的湍流区域,在近壁面区域内,湍流雷诺数很低,必须考虑分子黏性的影响。

采用壁面函数可以解决近壁面处高雷诺数模型存在计算偏差的问题,而且还不要要求在速度梯度很

大的黏性支层内布置很多节点,节省了计算时间与所需内存,且精度完全满足实际工程需要。采用标准  $k-\epsilon$  模型求解湍流对流换热问题时,控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程及  $\epsilon$  方程,在这一方程组中引入系数  $c_1, c_2, c_{\mu}$  和常数  $\sigma_k, \sigma_{\epsilon}, \tau_0$ 。近年发表的文献中,这 6 个经验常数的取值已比较一致(表 1)。

表 1  $k-\epsilon$  模型中的系数<sup>[11]</sup>

$c_{\mu}$	$c_1$	$c_2$	$\sigma_k$	$\sigma_{\epsilon}$	$\tau_0$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9~1.0

## 1.2 结构模型

1) 单元的选取。研究温室结构风压分布规律时,取单栋温室的中间一榀框架作为分析单元。温室结构形式见图 1,其主要杆件基本参数见表 2。

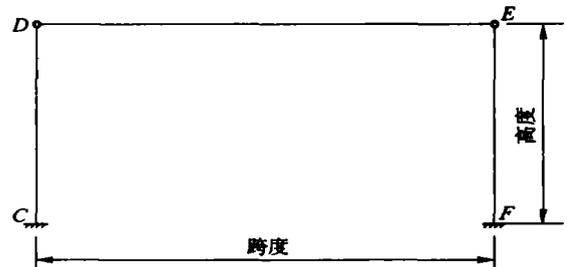


图 1 单跨温室结构形式

Fig. 1 Simplified model of one-span greenhouse structures

表 2 温室结构杆件材料特性及截面特征参数

Table 2 Material characteristics and section parameters of the greenhouse structures component

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
边柱	方钢管 80 ×100 ×2	$0.71 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-6}$	210	79
中柱	方钢管 80 ×80 ×2	$6.25 \times 10^{-4}$	$6.33 \times 10^{-7}$	210	79
梁	槽型截面 60 ×30 ×15 ×1.5	$1.60 \times 10^{-4}$	$4.64 \times 10^{-9}$	210	79

## 2) 结构分析。

应用有限元方法对风荷载作用下温室的结构效应进行了计算。整个结构系统的动力方程<sup>[9]</sup>为

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = f \quad (2)$$

式中:  $u$  为结点位移向量;  $\dot{u}$  为结点速度向量;  $\ddot{u}$  为结点加速度向量;  $M$  为结构质量矩阵;  $C$  为结构阻尼矩阵;  $K$  为结构刚度矩阵;  $f$  为载荷向量。

式(2)中,矩阵  $C$  一般难以由有限元法直接形成,需按不同的阻尼假设进行处理。本文中采用 Releigh 假定<sup>[9]</sup>,即

$$C = M + K \quad (3)$$

式中:  $\omega_1, \omega_2$  可利用模态分析所得的前二阶圆频率 ( $\omega_1, \omega_2$ ) 及阻尼比 ( $\zeta_1, \zeta_2$ ) 得到

$$C = \frac{2(\zeta_1 \omega_1^2 M + \zeta_2 \omega_2^2 M)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} = \frac{2(\zeta_1 \omega_1^2 M + \zeta_2 \omega_2^2 M)}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (4)$$

温室结构阻尼比 取 0.02<sup>[10]</sup>。

## 1.3 耦合模型及处理方法

风与结构的相互作用问题在广义上可归纳为流

体与结构之间的相互作用问题。对于温室结构,考虑到进入塑性受力阶段可能使结构产生疲劳破坏,因此须按照弹性受力进行分析。本文中假定自然风为瞬态、黏性、不可压缩湍流流体,将风压作用下温室结构效应的研究简化为瞬态的线性流-固耦合问题进行计算分析。风流体与结构的耦合作用仅发生在两相交界面上,耦合效应通过在方程中引入两相耦合面的平衡及协调关系来实现。

## 2 固定边界下的流场分析

由于自然风的运动具有随机性,其本质上是与

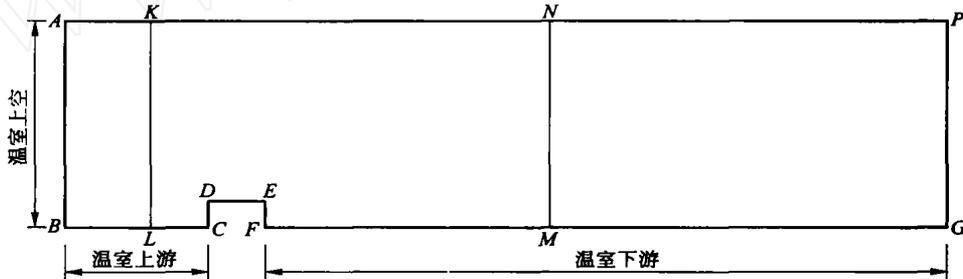


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Whole fluid analysis region

### 2.2 边界条件<sup>[11]</sup>

1) 来流边界。采用指数律表示风速沿高度的变化规律(式(1))。

2) 入口处湍流动能  $k$  和湍流能耗散率  $\epsilon$ 。

$$k = \frac{2(u^2 + v^2)}{[\ln(y/y_0)]^2 C_u^{1/2}} = (c_u^{3/4} k^{3/2}) \cdot y^{-1} \quad (5)$$

其中  $C_u = 0.41$  为卡门常数。

3) 出口 ( $PG$ (图 2, 下同)) 边界。  $\partial(\ ) / \partial x = 0$ ,  $\epsilon = (u, v, k, \epsilon)$

4) 壁面 ( $CD$ 、 $DE$ 、 $EF$ ) 边界。固体壁面上采用无滑移条件,即结构表面取  $u = v = k = \epsilon = 0$ ,在近壁区采用壁面函数。

5) 地面及上空面 ( $BC$ 、 $FG$ 、 $AH$ ) 边界。纵向速度  $v$  为 0,其他变量法向导数为 0,  $\partial(\ ) / \partial y = 0$ ,  $\epsilon = (u, k, \epsilon)$ 。

6) 温室结构底部固支。

### 2.3 计算结果与分析

从图 3 可见,平均风作用下,不考虑耦合作用时,风压最大值(风吸力)出现在  $D$  点;结构迎风面主要受风压力作用,  $C$  点风压值最大,沿柱高压压

时间相关的瞬态湍流流动。自然风可以看作平均风和脉动风之和。下面进行平均风作用下,不考虑流固耦合时温室结构风压的计算。建模时流体采用 Fluid141 单元,结构采用 Beam3 单元和 Link1 单元。

### 2.1 二维流动计算模型

二维流动的计算区域见图 2。温室高度为  $H$  ( $CD = FE = H$ ),跨度为  $2H$  ( $CF = DE = 2H$ );进口边界在温室上游  $5H$  ( $BC = 5H$ ) 处;出口边界取在温室下游  $24H$  ( $FG = 24H$ ) 处;上空面取在  $8H$  ( $AB = PG = 8H$ ) 处,其中  $H = 3$  m。网格划分时,温室近壁区和近地面区域进行网格加密。

变化很小,接近  $D$  点时逐渐变小并成为风吸力;屋面全部为风压力,迎风面最大,到背风面风压减小为  $197.79$  Pa;结构背风面受风吸力作用,分布较均匀,  $F$  点风吸力为  $192.21$  Pa。温室结构表面风压沿柱方向分布均匀,从柱底随柱高度增加略有增大。由于温室较低,故随其高度增加风压增大不明显。该结构表面风压的分布与《建筑结构荷载规范》<sup>[10]</sup> 给出的结构风压系数所反映的结构风压分布一致。

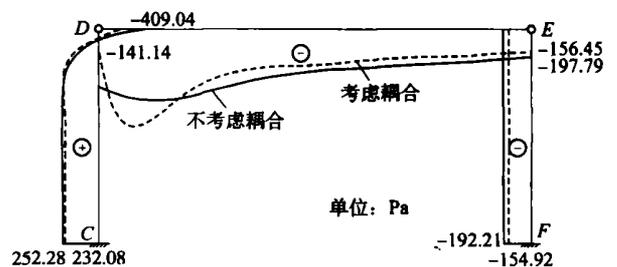


图 3 温室表面风压曲线

Fig. 3 Pressure on surface of greenhouse

## 3 流固耦合下的风压效应分析

### 3.1 流固耦合分析技术

稳定流动下,研究温室结构-风相互耦合的问题

时,将大气边界层视为稳态、黏性、不可压缩湍流流体。用有限元计算软件 Ansys 建模时,建立 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。模拟区的流场为充分发展的流场。

整个计算区域见图 2,  $LC = 2H$ ,  $FM = 10H$ 。网格划分时,在温室近壁区和近地面区域进行加密。

### 3.2 流固耦合风压数值分析步骤

- 1) 建立流体、结构模型;
- 2) 生成流体物理环境;
- 3) 生成结构物理环境;
- 4) 读入流体物理环境,进行流体计算;
- 5) 读入结构物理环境,将流体压力作为结构荷载;
- 6) 进行结构计算;
- 7) 进行结构效应收敛性判断,若收敛则结束,否则至 8);
- 8) 以变形后的结构作为边界条件,流体区域网格变形,转到 4);
- 9) 结束。

### 3.3 计算结果及分析

平均风作用下,当考虑耦合作用时,温室结构从下到上位移逐渐变大, $D$  点位移最大,为 0.0074 m。这是因为风速随高度的变化逐渐增大,作用在温室结构上的压力也逐渐变大。由图 3 可以看出:1) 考虑与不考虑耦合作用时,温室结构表面的风压分布一致:迎风面主要受风压力作用,背风面受风吸力作用,且分布均匀;屋面受风压力,迎风面最大,到背风面风压逐渐减小。2) 考虑耦合作用时温室结构表面的风压比不考虑耦合作用时小,这是因为考虑耦合作用时,把变形后的温室结构作为边界条件,对温室周围流体的网格进行了重新调整。

## 4 脉动风下的风振效应模拟

### 4.1 脉动风模型

研究温室结构在脉动风下的风振问题时,在瞬时时间间隔内,将大气边界层视为稳态、黏性、不可压缩湍流流体,其中湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  模型,控制方程与平均风下风流体相同。本文中脉动风模型采用 Davenport 水平脉动风速谱<sup>[12]</sup>。

### 4.2 脉动风速时程转化

结构上的脉动风速通常被看作各态历经的零均值的平稳随机过程,其模拟的方法有谐波叠加法和

线性滤波法。本文中采用谐波叠加法中的 shinozuka 方法<sup>[13]</sup>对温室结构顺风向的脉动风速进行模拟。

根据脉动风顺风向水平风速谱<sup>[12]</sup>和来流风模拟风速<sup>[13]</sup>计算公式,用 MATLAB 编制前 100 s 脉动风速模拟程序,其时程曲线见图 4。

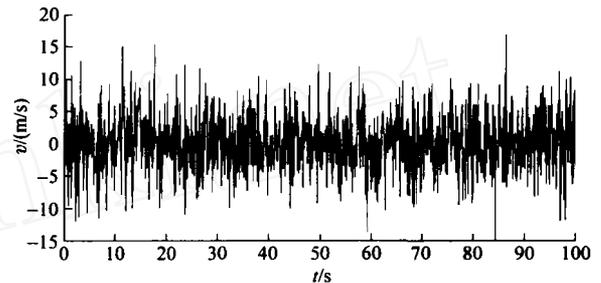


图 4 脉动风速时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of fluctuant wind

### 4.3 脉动分析方法

结构在脉动风作用下的效应分析步骤:

- 1) 建立分析的流体、结构模型。
- 2) 读入时程风速。
- 3) 时间步长循环:  $t_0 = 0$ ,  $t_n = 100$  s,  $t = 0.1$  s。
- 4) 时刻  $t$  的脉动风速计算。
- 5) 进行流场分析。
- 6) 读取耦合面流场压力。
- 7) 对耦合面结构施加荷载。
- 8) 进行结构分析。
- 9) 计算结构位移。
- 10) 判断结构位移是否收敛。如果收敛,存储结构变形参数,转到 3); 不收敛,则改变流场边界,转到 5)。
- 11) 结束。

### 4.4 脉动数值模拟结果

脉动风荷载作用下,考虑耦合作用时温室结构  $D$  点的位移响应见图 5,该点最大位移值为 0.21 m。

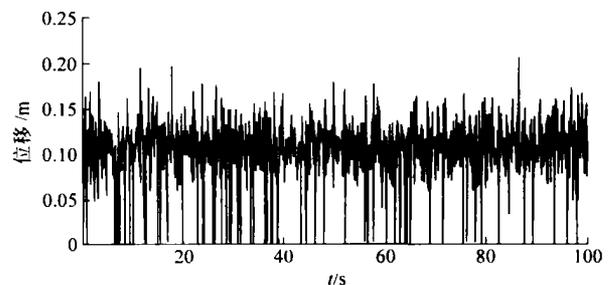


图 5 考虑耦合作用时温室结构  $D$  点的位移时程

Fig. 5 Time-history of displacement of  $D$  node considering fluid-structure coupling

## 5 结 论

利用 CFD 方法对脉动风下温室结构的风压进行了数值模拟,并考虑了流-固耦合作用。

1) 在平均风压作用下,不考虑和考虑耦合作用时,温室结构整体受力、变形趋势大致相同(图3)。

2) 考虑流-固耦合作用时,结构表面的风压(迎风面最大 241.46 Pa,背风面最大 - 156.45 Pa)较不考虑耦合作用时都略有减小(迎风面最大 258.76 Pa,背风面最大 - 197.79 Pa)。结构最不利位置为屋面,当考虑流-固耦合作用时其风吸力峰值(681.31 Pa)比不考虑流-固耦合作用时(483.64 Pa)增加约 41%;因此,在结构设计中考虑风流体与结构的耦合作用是必要的。

3) 与平均风压作用下结构最大位移(0.007 4 m)相比,脉动风作用下结构最大位移(0.21 m)显著增大。可见,在进行温室结构抗风设计时,风振效应对温室结构的影响较大,因此在计算温室结构的风压时,应考虑风振对结构的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Lee FB, Kang C, Lee S. Development of vertical wind and turbulence profiles of wind tunnel boundary layers [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(5): 1717-1726
- [2] Henry W T, Ge Zhongfu, Muhammad R H. Theoretically estimated peak wind loads[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(2): 113-132
- [3] Robertson A P, Roux Ph, Gratraud J. Wind pressures on permeably and impermeably-clad structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(5): 461-474
- [4] Zhang Enuo, Yang Weiguo, Zhen Wei. Software practicalization for analysis of Wind-induced vibrations of large span roof structures[J]. Tsinghua Science and Technology, 2005, 10(3): 354-358
- [5] 宋占军. 主架和次架相间排列的多连拱温室受风载时的计算研究[J]. 上海农业学报, 1998, 14(1): 70-74
- [6] 赵国藩. 工程结构可靠性理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 1996
- [7] 周长吉. 有立柱钢管骨架日光温室的结构优化. 农业工程学报, 1994, 10(1): 157-160
- [8] 蒋秀根, 剧锦三, 张丽莉. 考虑桁架刚度的温室结构风载效应分析方法[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(6): 70-74
- [9] 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
- [10] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002: 24-47
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. (第2版). 西安:西安交通大学出版社, 2001: 306-308, 332-356
- [12] 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
- [13] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its application[J]. J Sound Vibr, 1972, 25(1): 111-128