

文章编号:1673-2049(2007)01-0042-05

# 高层建筑三维非定常风场并行计算的数值模拟

周月庭,吕令毅

(东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 210096)

**摘要:**为了分析风洞试验中观测到的高层建筑模型尾流有规律的漩涡脱落现象,基于计算流体动力学软件 CFX 和消息传递接口(MPI),利用局域网搭建了并行计算平台,实现了单台计算机无法实现的高层建筑三维非定常风场数值计算。采用剪应力模型(SST)进行数值计算,捕获到了高层建筑尾流的漩涡脱落现象,并与风洞试验数据做了比较。结果表明,三维非定常计算获得的高层建筑表面风压变化规律,较之三维定常和二维非定常计算所得的风场,能更真实地反映风场流动情况。

**关键词:**高层建筑;风压;漩涡脱落;非定常风场;并行计算;数值模拟

中图分类号:TU973.32

文献标志码:A

## Numerical Simulation of 3-D Unsteady Wind Field Around High-rise Building on Parallel Computation

ZHOU Yue-ting, LU Ling-yi

(Key Laboratory for RC and PC Structure of Ministry of Education, Southeast University,  
Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to analyze the regular vortex shedding phenomena of high-rise building model observed by wind tunnel test, authors first established a parallel computing platform using the general software of computational fluid dynamics CFX and local area network with the message passing interface (MPI) network parallel environments, then, simulated a 3-D unsteady wind field around high-rise building while the simulation couldn't be settled by a single computer. The vortex shedding phenomena were captured by numerical simulation with shear stress transport (SST) turbulence model. The comparison between numerical simulation and wind tunnel test was given. The results show that the varying rules of surface wind pressure on the high-rise building are acquired through 3-D unsteady simulation, and 3-D unsteady simulation's results are used to predict the wind field more truly than 3-D steady and 2-D unsteady simulations' results.

**Key words:** high-rise building; wind pressure; vortex shedding; unsteady wind field; parallel computation; numerical simulation

## 0 引言

20 世纪 80 年代以来,各国计算风工程研究逐步发展起来。目前中国建筑结构抗风的数值模拟还主要集中在定常数值模拟<sup>[1-3]</sup>,迄今为止,高层建筑

高雷诺数的三维非定常风场数值模拟还未见有过报道<sup>[4-7]</sup>。对于定常湍流,时均值与时间无关而仅是空间位置的函数。从严格意义上讲,几乎所有的漩涡流动都是非定常的,或者说,至少具有某种弱的非定常特性。非定常湍流与漩涡是自然界中普遍存在的

收稿日期:2007-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50478074)

作者简介:周月庭(1982-),男,江苏盐城人,工学硕士研究生,E-mail:zhou010309@163.com。

流体运动形式,非定常湍流主要研究的是流动特性随时间变化的物理过程<sup>[8]</sup>。在风洞模型试验中可观测到建筑物尾流有规律的漩涡脱落现象,而且脱落的频率较为固定,这种流态是建筑物和风场之间共同作用而形成的非定常流态<sup>[9]</sup>。

在运用大涡模拟(LES)方法模拟高层建筑高雷诺数的非定常风场还不可行的情况下,基于雷诺平均(RANS)方法的重整化群  $k-\epsilon$  (RNG  $k-\epsilon$ ) 等模型,在一定程度上可以较好地预测钝体绕流的漩涡脱落现象,初步获取高层建筑周围非定常风流场的信息<sup>[10]</sup>。与三维定常数值模拟相比,三维非定常数值模拟需要更细密的计算网格及很小的时间步长,对计算资源的要求更高,因此很难在普通计算机上实现<sup>[11]</sup>。本文中以计算流体动力学软件 CFX 为基础,在 MPI 网络并行环境下,利用局域网搭建了并行计算平台,模拟了高层建筑由于尾流漩涡脱落引起的非定常风流场,探讨了三维非定常数值计算与三维定常数值计算、二维非定常数值计算的差异。

## 1 数值计算方法

### 1.1 控制方程

在计算风工程中,钝体绕流问题控制方程是黏性不可压缩 N-S 方程。在直角坐标系下,基于 RANS 方法的连续性方程和动量方程为

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_i \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为流体微元体速度矢量场在  $i$  方向的分量;  $\rho$  为风流体密度;  $p$  为风压;  $S_i$  为  $u_i$  的源项。

在采用 RANS 方法的湍流模型中,基于计算流体力学软件 CFX 的剪应力模型(SST  $k-\omega$ )在高雷诺数钝体绕流数值模拟中预测结果相对较好,计算效率高。剪应力输运模型控制方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (4)$$

式中:  $k$  为湍流动能;  $\omega$  为湍流动能比耗散率;  $G_k$  为由速度梯度引起的湍流动能生成项;  $G_\omega$  为  $\omega$  的生成项;  $\Gamma_k$  和  $\Gamma_\omega$  分别为  $k$  和  $\omega$  的对流项;  $Y_k$  和  $Y_\omega$  分别为由于湍流引起的  $k$  和  $\omega$  的有效扩散项;  $D_\omega$  为  $\omega$  的交叉对流项。

本文中采用 SST  $k-\omega$  模型来模拟湍流流动,在

壁面采用壁面函数以考虑钝体流动产生的分离流动特征。压力与速度采用耦合式解法,动量方程和湍流动能耗散率方程均采用 2 阶离散格式。

### 1.2 计算区域与网格

建筑模型的尺寸为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ , 计算区域设置为:上游  $600 \text{ m}$ ,下游  $1\,200 \text{ m}$ ,高  $600 \text{ m}$ ,两侧宽  $240 \text{ m}$ ,阻塞率为  $1.25\%$ 。采用分区非结构六面体网格对计算域进行离散,六面体网格单元的总量为  $1.384 \times 10^6$  个。计算区域划分与网格如图 1、2 所示。

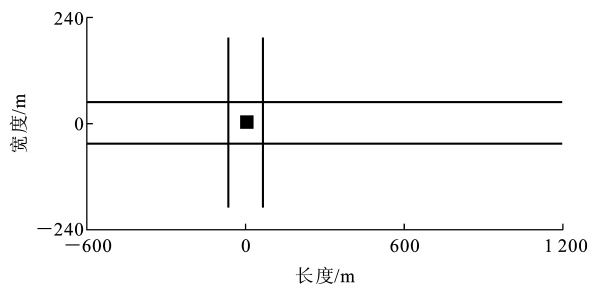


图 1 计算域分区

Fig. 1 Division Area of Calculation Domain

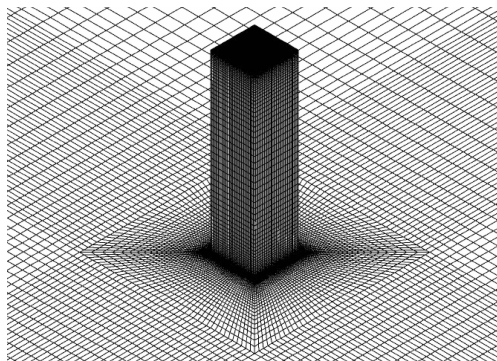


图 2 局部网格

Fig. 2 Local Grids

### 1.3 边界条件

进流面采用速度入口,风速和湍流强度的取法与文献[1]相同,根据湍流强度并利用经验公式计算来流的湍流动能和耗散率;出流面采用压力出口边界条件,压力取为  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;流域顶部及两侧采用自由滑移壁面;建筑物表面及地面采用无滑移壁面。

## 2 并行计算

### 2.1 软、硬件环境

结构风工程中所涉及的通常都是高雷诺数问题,其值一般在  $10^7$  左右。高雷诺数计算对网格数量要求较大,特别是三维非定常计算,需要更细密的

计算网格以捕获流场的非定常特性,计算的网格单元、节点数量均在  $10^6$  个以上,同时非定常计算需要很小的空间和时间步长,因此对计算机的 CPU 和内存的要求均很高。并行计算可以大幅度地缩短计算时间,它可以利用多台计算机的内存实现单机无法模拟的大规模数值计算,所以本文中采用了并行计算。

目前的并行计算分为两类:一类是基于大规模并行计算机的并行计算,另一类是基于网络并行环境的并行计算。网络并行环境主要有 PVM、MPI 等。笔者在 MPI 网络并行环境下,利用局域网搭建了分布式计算机并行计算平台。该平台由 3 台计算机组成,计算机编号及配置分别为:计算机 1, Athlon 1.8 GHz, 1 G 内存;计算机 2, P4 2.4 GHz, 1 G 内存;计算机 3, P4M 1.5 GHz, 0.75 G 内存。网络由 100 Mbps 网卡和交换机组成。

2.2 负载分配

实现计算方法的并行有多种方式,就流场的计算而言,实现较为容易且计算效率较高的一种方法是区域分解法,即将流场区域分为多个计算区域,每台计算机的 CPU 独立处理被分配到的计算区域内部网格点,在计算到区域边界时,区域之间进行数据信息的交换以保证计算的顺利进行。这种并行算法的优点是并行度较高,对于三维流场的计算,数据的交换仅发生在几个二维的区域边界上,数据交换量较少,因此并行效率较高。

网络并行环境的并行计算的关键在于负载平衡、计算量与通信量之比。由于本次数值模拟所搭建的并行计算平台的计算机数量较少,所以提高计算效率的关键在于使每个计算节点的计算时间相当,减少等待时间。在进行本文中的数值计算之前,先进行一个较小规模问题的计算,以调整计算的负载分配,提高并行计算效率。

首先需测试各台计算机的相对速度和可用内存,经测试计算机 1、2、3 的速度比约为 1.2 : 1.0 : 1.0, 可用内存之比约为 1.5 : 1.5 : 1.0。根据以上条件优化分配的计算机负载分配量比为 1.2 : 1.0 : 0.8。并行计算效率一般用加速比和并行效率来衡量,即

$$S_p = \frac{T_s}{T_p}, E_p = \frac{T_s}{nT_p} = \frac{S_p}{n}$$

(5)

式中:  $T_s$  为串行算法在单处理机上的运行时间;  $T_p$  为并行算法在具有  $n$  个处理机的并行系统上的运行时间。

该平台的计算效率见表 1, 由表 1 可知:通过合理的负载分配,所搭建的并行计算平台的加速比较大,并行计算效率较高。

表 1 MPI 网络并行环境下的计算效率

Tab. 1 Computing Efficiencies Under MPI Network Parallel Environments

运行环境	计算时间/s	加速比	计算效率/%
计算机 2	3 018	1.00	100
MPI 网络并行	1 168	2.58	86

3 结果分析

非定常绕流数值迭代计算以定常绕流计算结果为初场,计算由于尾流漩涡脱落引起的非定常风流场。计算时间步长为 0.05 s,迭代计算了 6 000 步,共计 300 s 的流态,并行计算耗时约 500 h。

计算过程中,在建筑物的侧面上对称设置了 8 个测压点,考察建筑物表面由于漩涡脱落而引起的风压脉动,测压点坐标见表 2。

表 2 测压点坐标

Tab. 2 Coordinates of Monitoring Pressure Points m

测压点		1、2	3、4	5、6	7、8
坐标	$x$	0	0	0	0
	$y$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$
	$z$	40	60	80	100

注:奇数测压点的  $y$  坐标为  $-15$  m。

建筑物表面的压力系数为

$$C_p = \frac{p - p_{ref}}{1/(2\rho U_z^2)}$$

(6)

式中:  $p_{ref}$  为参考静压力;  $U_z$  为入流速度。

测压点 5、6 的风压系数的并行计算时程曲线如图 3(a) 所示。

由图 3(a) 可以看出:计算到 240 s 时,高层建筑尾流中出现明显的非定常漩涡脱落,测压点的风压呈周期性交替变化。各测压点在 215~300 s 的风压时程曲线如图 3(b)、(c) 所示。

由图 3(a)、(b) 和表 3 可知:通过三维非定常计算可以得到高层建筑由于尾流漩涡脱落引起的非定常风场,而三维定常计算结果不随时间变化,仅与空间位置有关,因此不能反映风场流动的实际情况。由表 3 还可知,非定常计算的风压时均值比三维定常计算的风压有不同程度的增大,且随着高度的增大,风压的增大系数将逐渐减小。

与三维非定常计算相比,二维非定常计算的风压时均值和脉动幅值远大于三维非定常数值计算结果;由图 3(a)、(b) 对比可知,各个高度处的脉动风

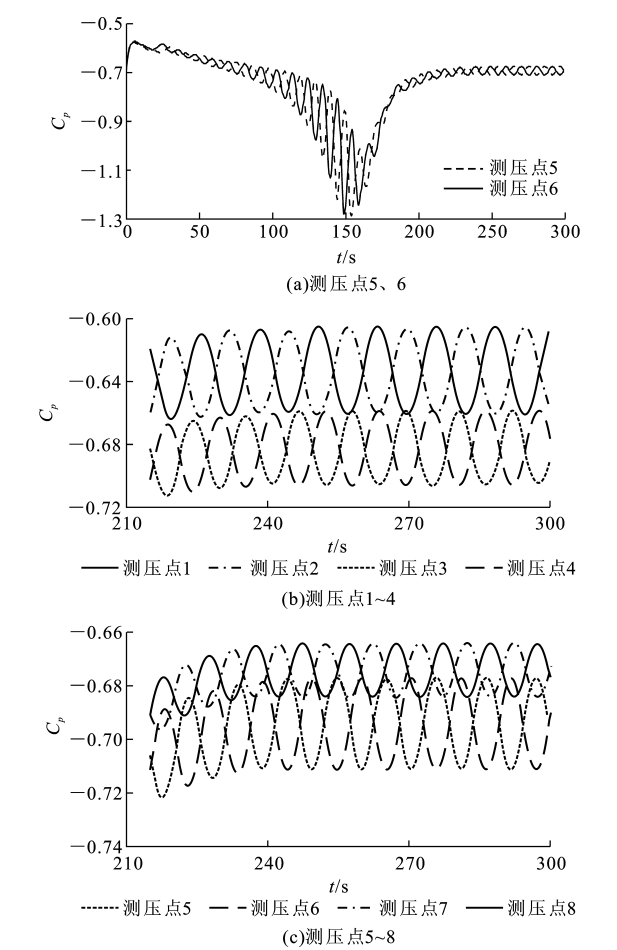


图 3 测压点风压系数时程

Fig. 3 Time-histories of Wind Pressure Coefficients of Monitoring Pressure Points

表 3 各类计算的风压系数值比较

Tab. 3 Comparison of Wind Pressure Coefficients Under All Kinds of Calculations

测压点	1、2	3、4	5、6	7、8
三维定常计算值	-0.501	-0.596	-0.642	-0.626
三维非定常时均值	-0.633	-0.682	-0.694	-0.674
非定常风压增幅/%	26.2	14.6	8.1	7.7
二维非定常时均值	-1.624			
三维非定常幅值	0.028	0.024	0.017	0.011
二维非定常幅值	1.172			

注:二维非定常值项为采用与三维非定常80 m高度处相同边界条件计算的结果。

压的峰值并不是出现在同一时刻,而是存在一定的时差;各个高度处的脉动幅值不同,且随着高度的增加,风压的脉动幅值将逐渐减小,这是由于高层建筑顶部尾流的影响所致,这些都体现出湍流显著的三维特性。建筑物侧面对称两点的风压变化呈现出周期性交替变化,且一侧风压达到最大值时,另一侧对称位置的风压达到最小值。将三维非定常计算所得

的各个测压点的风压时程曲线作 FFT 变换,所得的主频率换算成反映漩涡脱落的斯脱拉哈数,其值为 0.09,二维非定常计算所得的斯脱拉哈数为 0.13。文献[12]中通过风洞试验得到的长宽比为 1 的矩形截面的斯脱拉哈数为 0.087。三维非定常数值模拟的结果与风洞试验的结果比较接近。由此可得,高雷诺数下的三维非定常数值计算不能简化为二维非定常数值计算,否则计算误差较大。

4 结 语

- (1)以计算流体动力学软件 CFX 为基础,在 MPI 网络并行环境下,利用局域网搭建了并行计算平台,实现了单台计算机无法实现的高层建筑三维非定常风场数值模拟,并行计算平台达到了较高的加速比和并行效率,大幅度缩短了计算时间。
- (2)采用剪应力模型 SST 计算高层建筑非定常风流场,获得了尾流的漩涡脱落现象及相应的风压变化规律。与定常计算的风场相比,非定常计算的风场能更加真实地反映实际风场流动的情况。
- (3)二维非定常数值模拟只是三维非定常数值模拟的简化,在高雷诺数情况下,二维非定常数值计算无法完整地体现湍流在 3 个方向上的发展和演化规律,且两者计算结果相差较大。

参考文献:

References:

[ 1 ] 杨 波,吕令毅.应用 CFD 技术预测国家大剧院表面风压[J]. 建筑科学,2005,21(4):38-41.  
YANG Bo,LU Ling-yi. Numerical Simulation of Wind Pressure Distribution on the Chinese National Grand Theatre[J]. Building Science,2005,21(4):38-41.

[ 2 ] 洪 亮,周志勇,葛耀君.复杂外形建筑物黏性流动 CFD 数值研究[J]. 水动力学研究与进展,2006,21(2):267-275.  
HONG Liang,ZHOU Zhi-yong,GE Yao-jun. Practical CFD Research on Compositive Viscous Flow Around Complicated Buildings[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006,21(2):267-275.

[ 3 ] 彪仿俊,孙炳楠,沈国辉.双塔楼建筑风场及平均风荷载的数值模拟[J]. 科技通报,2006,22(1):77-83.  
BIAO Fang-jun,SUN Bing-nan,SHEN Guo-hui. Numerical Simulation of Mean Wind Pressure and Wind Flow Around Double-tower Tall Building[J]. Bulletin of Science and Technology,2006,22(1):77-83.

[ 4 ] 张琳琳,李 杰.脉动风速互随机 Fourier 谱函数[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(2):57-61.

- ZHANG Lin-lin, LI Jie. Cross Stochastic Fourier Spectrum Function of Turbulence Wind Velocity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2):57-61.
- [5] 沈世钊, 武岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):1-9.
- SHEN Shi-zhao, WU Yue. Research Progress on Fluid-solid Interaction Effect of Wind-induced Vibration Response of Membrane Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):1-9.
- [6] 武岳, 陈波, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静风荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4):27-31.
- WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shi-zhao. Research on Equivalent Static Wind Loadings of Large-span Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):27-31.
- [7] 倪振华, 段旻, 谢壮宁. 柱壳屋盖的等效静风荷载[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):17-22.
- NI Zhen-hua, DUAN Min, XIE Zhuang-ning. Equivalent Static Wind Loads of Cylinder Roof[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):17-22.
- [8] 童秉纲, 张炳暄, 崔尔杰. 非定常流与涡运动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993:286-300.
- TONG Bing-gang, ZHANG Bing-xuan, CUI Er-jie. Unsteady Flow and Vortex Motion[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993:286-300.
- [9] 葛楠, 周锡元, 侯爱波. 建筑结构横向脉动风压谱密度函数的分析计算[J]. 建筑科学, 2006, 22(1):10-14.
- GE Nan, ZHOU Xi-yuan, HOU Ai-bo. A Solution for the Spectral Density Function of Across Wind Load Fluctuation[J]. Building Science, 2006, 22(1):10-14.
- [10] SWADDIWUDHIPONG S, KHAN M S. Dynamic Response of Wind-excited Building Using CFD[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(4):735-754.
- [11] 孙哈琦. 并行计算在计算流体力学中的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- SUN Han-qi. Research of Parallel Computing in Computational Fluid Dynamics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [12] 梁枢果, 刘胜春, 张亮亮, 等. 矩形高层建筑横风向动力荷载解析模型[J]. 空气动力学学报, 2002, 20(1):32-39.
- LIANG Shu-guo, LIU Sheng-chun, ZHANG Liang-liang, et al. Analytical Model of Across Wind Dynamic Loads on Rectangular Tall Buildings[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002, 20(1):32-39.
- (上接第 41 页)
- HONG Ding-hai. Protection and Corrosion of Steel in Concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998.
- [3] TANG L, NILSSON L. Chloride Binding Capacity and Binding Isotherm of OPC Pastes and Mortars[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(2):247-253.
- [4] DHIR R K, EL-MOHR M A K, DYER T D. Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11):1 633-1 639.
- [5] DHIR R K, JONES M R. Development of Chloride-resisting Concrete Using Fly Ash[J]. Fuel, 1999, 78(2):137-142.
- [6] 马保国. 海洋高性能混凝土(MHPC)的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2000.
- MA Bao-guo. Research on Maritime High Performance Concrete[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2000.
- [7] 贺拴海, 吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1):71-75.
- HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):71-75.
- [8] 王东阳, 陈淑贤. 水下不分散混凝土耐久性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1):54-58.
- WANG Dong-yang, CHEN Shu-xian. Durability Study of Underwater Nondispersible Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1):54-58.
- [9] 陈拴发, 郑木莲, 王秉纲. 粉煤灰混凝土应力腐蚀特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3):14-17.
- CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang. Experimental Research on Stress Corrosion Character of Fly-ash-cement Concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3):14-17.
- [10] MEJLHEDE J O, FREIESLEBEN H P. Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 29(12):1 497-1 504.