

# CAARC 标准高层建筑三维钝体绕流风场数值模拟

聂少锋<sup>1</sup>, 周绪红<sup>1,2</sup>, 周天华<sup>1</sup>, 石宇<sup>1</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710064; 2. 兰州大学土木与力学学院, 兰州 730000)

**摘要:**基于计算流体力学软件平台 Fluent 6.3, 选用基于雷诺平均(RANS)的标准  $k-\epsilon$ 、Realizable  $k-\epsilon$ 、RNG  $k-\epsilon$  和 SST  $k-\omega$  4 种湍流模型对大气边界层中 CAARC 标模的单栋高层建筑的三维定常风场进行模拟分析, 并将数值模拟结果与风洞试验结果进行了比较分析。结果表明:数值模拟较好地反映了高层建筑周围风环境的绕流特性和表面风压的分布情况, 4 种湍流模型均能给出满足工程应用精度的结果。在迎风面时, 与试验结果吻合良好; 在侧风面和背风面时, 数值模拟结果介于 NPL 与 TJ-2 试验结果之间。迎风面均受有正压力, 在迎风面的 2/3 高度处为最大, 两边及底下最小。建筑物的背风面和侧风面全部承受负压力。4 种湍流模型的模拟结果之间差异较小, 为高层建筑钝体绕流的研究提供了依据。

**关键词:**计算流体力学; 高层建筑; CAARC 标模; 湍流模型; 数值分析

**中图分类号:** TU312.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0040-07

## Numerical Simulation of 3D Atmospheric Flow Around a Bluff Body of CAARC Standard High-Rise Building Model

NIE Shao-feng<sup>1</sup>, ZHOU Xu-hong<sup>1,2</sup>, ZHOU Tian-hua<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, P. R. China)

**Abstract:** Based on Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations(RANS) standard  $k-\epsilon$  model, realizable  $k-\epsilon$  model, RNG  $k-\epsilon$  model and SST  $k-\omega$  model, the 3D steady wind flow field around standard high building CAARC in atmospheric boundary layer was numerically simulated with software Fluent 6.3. And upon the comparison with those from wind tunnel test, it was found that numerical simulation was a feasible way to study the wind flow around high building and the distribution of wind pressure in the building's surface. The four proposed models can reach the accuracy from the actual demand. Furthermore, it was also shown that, the numerical results were approximate to those from wind tunnel tests in the windward while between those from NPL and TJ-2 tests in the side and leeward. The pressure on the windward surface was positive with the maximum at 2/3 height and the minimum on the sides and the bottom. The pressures on the leeward surface and two sides were negative. There were little differences among the results of the four models.

**Key words:** computational fluid dynamics; high-rise building; CAARC model; turbulence model; numerical analysis

研究风作用下高层建筑周围的空气绕流运动, 主要目的是寻求高层建筑外表面上的风压分布规

收稿日期: 2009-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50078021); 教育部高等学校博士学科点专项基金项目(2000053203)

作者简介: 聂少锋(1981-), 男, 博士, 主要从事结构工程研究, (E-mail)niesf126@126.com。

周绪红(联系人), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)zxh@LZH.edu.cn。

律。高层建筑外表面上的风压分布,对于高层建筑风荷载的计算是不可缺少的资料。传统的研究方法有2种:现场实测和风洞试验。但是高层建筑的现场实测开展比较困难,只能对特定的已有建筑进行现场实测。因此,在工程应用中,为获得结构风荷载常用风洞试验的方法。风洞试验是将实际结构按一定规则缩小做成模型,在风洞中利用模拟的实际风环境进行试验获得结构风荷载,这比现场实测方便经济得多,是目前公认较为准确的确定结构风荷载的方法。

但是,不论是风洞试验,还是现场实测都存在着试验经费大、周期长等问题,更重要的是不易进行系统地参数分析。随着计算机软硬件水平的飞速发展和计算流体力学(CFD, computational fluid dynamics)技术的不断完善,出现了与试验相对应的数值模拟方法。数值模拟方法已逐步成为继风洞试验后预测建筑物表面风压、周围风速和湍流特性的一种新的有效方法<sup>[1-2]</sup>。土木工程结构抗风的数值模拟多是钝体绕流问题。钝体流场的数值模拟在CFD计算中面临诸多困难,具有挑战性,这方面的研究在中国刚刚起步。

文献[3-4]由标准  $k-\epsilon$  模型得到的建筑表面风压及湍流能量等时均值与大气边界层风洞试验值有一定的吻合,但在建筑物背风面及侧风面处计算值偏小,回流区域也明显偏小,存在一定的误差的结论。文献[5-6]基于 CAARC 标准模型进行了干扰效应的风洞试验研究,并对干扰机理进行了分析。文献[7]通过采用雷诺应力模型和 SST 模型模拟了上海金茂大厦表面上有代表性点的平均风压系数,数值模拟结果与风洞试验结果基本吻合,并重点研究了周围两幢超高层建筑对该大厦的静力风干扰的影响。文献[8]采用标准  $k-\epsilon$  和 RNG  $k-\epsilon/2$  种湍流模型对一复杂体型的高层建筑表面风压及周围风环境进行了数值分析,并将计算结果与风洞试验结果进行比较,获得了该类建筑物表面风压的分布特性,并对建筑周围的风环境作了分析和评价。大型体育场馆和大跨度结构由于其体型复杂,其体型系数和风荷载特性往往需要风洞试验来确定<sup>[9-10]</sup>,其中,文献[9]对一复杂型体悬挑屋盖进行了风洞试验研究,并采用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对其进行了数值模拟,并根据试验和数值结果提出了改善屋盖悬挑部分的受风特性的措施。文献[11]采用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,对处于 B 类地貌风场中由 4 栋复杂体型高层建筑组成的建筑群进行了静力风荷载和风场的数值

模拟,着重讨论了复杂体型高层建筑之间的静力干扰效应。目前对建筑物三维风场的分析大都采用定常理论,文献[12]采用并行计算的方法和剪应力模型对高层建筑的三维非定常风场进行了数值计算,捕获到了高层建筑尾流的漩涡脱落现象。

该文基于专业 CFD 软件平台 Fluent 6.3 计算了 CAARC(Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council)标准模型的单栋建筑(长×宽×高=30.48 m×45.72 m×182.88 m)静态绕流的风流场,并以此对高层建筑的三维风流场进行了研究。重点放在合理建立适于钝体结构的数值风洞模型的探讨上,包括网格的划分、湍流模型的选取及参数设置等。与风洞试验的数据比较表明,在网格划分合理的情况下采用雷诺平均法(RANS)的 CFD 技术,可以进行有着较高可靠度的钝体三维流场分析。

## 1 数值研究

### 1.1 控制方程

计算风工程中,钝体绕流问题的控制方程是粘性不可压 Navier-Stokes 方程。当前应用最广的是基于雷诺时均的 N-S 方程,并由湍流模型进行封闭,再作离散求解的数值模拟方法。湍流时均流动的控制方程如下<sup>[14]</sup>:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'}) + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varphi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' \varphi'}) + S \quad (3)$$

上面3式分别为时均连续方程、雷诺方程和标量  $\varphi$  的时均输运方程。要使方程组封闭,必须对雷诺应力项  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$  作出某种假定,即引入新的湍流模型方程,把湍流的脉动值与时均值等联系起来。根据对雷诺应力做出假定或处理方式不同,常用的湍流模型有2大类:雷诺应力模型(RSM)和涡粘模型。涡粘模型中最具代表性的为2方程模型中的标准  $k-\epsilon$  模型。标准  $k-\epsilon$  模型在科学研究及工程实践中得到了最为广泛的检验和成功应用。但用于强旋流、弯曲壁面流动或弯曲曲线流动时,会产生一定的失真。原因是在标准  $k-\epsilon$  模型中,对于雷诺应力的各个分量,假定粘性系数  $\mu_t$  是各向同性的标量。建筑物背、侧面处气流将出现回流和分离现象,

湍流表现为较强烈的各项异性,  $\mu_t$  是各向异性的张量, 因此对预测非各向同性湍流不是特别理想。

为弥补标准  $k-\epsilon$  模型的缺陷, 许多研究者提出了对标准  $k-\epsilon$  模型的改进方案。其中, RNG  $k-\epsilon$  模型和 Realizable  $k-\epsilon$  模型就是 2 种应用比较广泛的改进方案。RNG  $k-\epsilon$  是由 Yakhot 及 Orzag<sup>[14]</sup> 提出的, 通过修正湍动粘度, 考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况; 湍流耗散率  $\epsilon$  在方程中考虑了主流的时均应变率  $E_{ij}$ , 因此, RNG  $k-\epsilon$  可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。Realizable  $k-\epsilon$  模型在湍动粘度计算中引入了与旋转和曲率有关的内容, 改变了耗散率  $\epsilon$  的方程, 被证明能更好的表示能量转换且克服了标准  $k-\epsilon$  模型有一个奇异点的缺陷<sup>[15]</sup>。目前, Realizable  $k-\epsilon$  模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟, 包括旋转均匀剪切流、包含射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动, 以及带有分离的流动等<sup>[13]</sup>。但是, 标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型和 Realizable  $k-\epsilon$  模型都是针对充分发展的湍流才有效的, 而在壁面区, 流动情况变化很大, 特别是在粘性底层, 流动几乎是层流, 湍流应力几乎不起作用, 因此, 需要采用壁面函数法将壁面上的物理量与湍流核心区内相应物理量联系起来<sup>[15]</sup>。

## 1.2 几何建模及网格划分

CAARC 高层建筑标准模型是 1969 年提出的国际上通用的风工程标准模型, 主要用来检验高层建筑模型风洞试验模拟技术, 以确保风洞试验测量数据的可信度<sup>[16]</sup>, 近年来, 国内外学者也以该高层建筑标准模型为基础进行了计算流体力学和空气动力学领域的相关研究<sup>[16-17]</sup>。该高层建筑的几何尺寸为  $30.48 \text{ m} \times 45.72 \text{ m} \times 182.88 \text{ m}$  ( $100 \text{ ft} \times 150 \text{ ft} \times 600 \text{ ft}$ )。文献<sup>[16]</sup>针对 CAARC 高层建筑标准模型分别进行了刚性测压风洞试验和动态天平风洞试验, 验证了 TJ-2 风洞大气边界层模拟技术的优良性, 测试仪器以及数据采集和处理系统的可靠性。TJ-2 风洞试验室试验段尺寸为  $3 \text{ m}$  (宽)  $\times 2.5 \text{ m}$  (高)  $\times 15 \text{ m}$  (长)。风速范围为  $0.5 \sim 68 \text{ m/s}$ 。刚性测压试验模型缩尺比为  $1:300$ , 试验中采用被动被动方法模拟风场, 风场几何相似比与模型相似比一致, 分别进行了 B、D 类地貌风场下的测压试验, 风洞试验阻塞比  $< 3\%$ 。试验中研究了不同风速对试验结果的影响, 并将 TJ-2 试验结果和各国风洞结构试验结果进行了对比分析。详细的试验过程和试验结果见文献<sup>[16]</sup>。

该文 CAARC 高层建筑标准模型采用足尺建模进

行分析。计算流域取为  $1\,800 \text{ m} \times 600 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ , 建筑物置于流域沿流向前  $1/3$  处。流域设置满足阻塞率  $< 3\%$  的要求, 以尽量消除计算域对模型附近流态的影响。模型几何尺寸及压力测点布置见图 1。

采用混合网格离散方式, 将计算区域分为内外 2 部分: 内部由一个立方体套住建筑物, 在模型附近的内部区域采用四面体单元, 网格较密; 在远离模型的外围空间, 采用采用六面体单元离散, 远离柱面的界面区域较稀疏, 2 部分之间通过软件自动处理成连续的流域。这样只要旋转内部模型就可以模拟不同风向, 且内部网格加密的建模方法有利于提高模拟精度。共生成 200 万左右个体单元的网格。CAARC 模型尺寸及压力测点布置见图 1, 网格划分如图 2 所示。

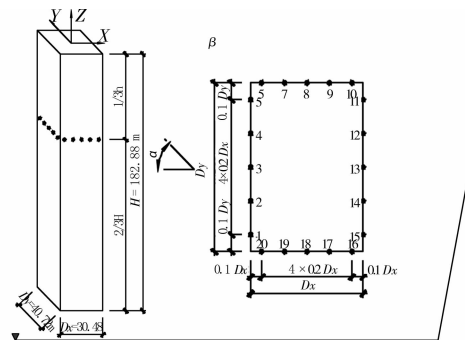


图 1 CAARC 几何尺寸及压力测点布置图

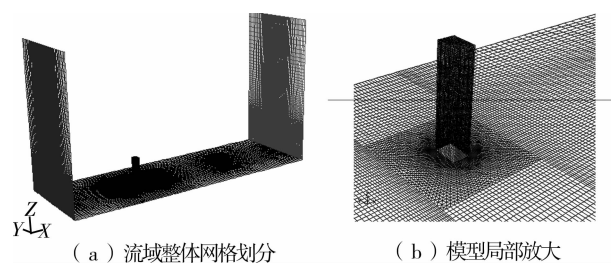


图 2 计算模型  $0^\circ$  风向角网格划分

## 1.3 边界条件的设定

进流面: 速度进流边界条件 (velocity-inlet), 模拟大气边界层风速剖面指数分布, 即:

$$U = U_0 \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中:  $Z_0$ ,  $U_0$  为参考高度和参考高度处的风速, 根据同济大学 TJ-2 风洞试验<sup>[16]</sup>, 分别取建筑物顶部高度 ( $183 \text{ m}$ ) 和顶部风速 (该文仅对 B 类和 D 类风场进行分析, 试验风速分别为  $11.7 \text{ m/s}$  和  $12.7 \text{ m/s}$ );  $Z$ ,  $U$  为流域中某高度和对应的平均风速;  $\alpha$  为地面粗糙度指数, B 类和 D 类风场分别取  $0.16$  和  $0.25$ 。中国 (GB 50009-2001)《建筑结构荷载规范》<sup>[18]</sup> 规

定的地貌粗糙度类别以及对应的梯度风高度  $Z_G$  和地面粗糙度指数  $\alpha$ , 见表 1。平均风速剖面采用 Fluent 的 UDF (user-defined functions) 编程与 Fluent 作接口实现。

表 1 我国地貌粗糙度类别和对应的  $Z_G, \alpha$  值

类别	描述	$Z_G/m$	$\alpha$
A	指近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	300	0.12
B	指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	350	0.16
C	指有密集建筑群的城市市区	400	0.22
D	指有密集建筑群且房屋较高的城市市区	450	0.30

出流面:由于出流接近完全发展,采用完全发展出流边界条件(outflow),流场任意物理量沿出口法向的梯度为零,即  $\partial\psi/\partial n = 0$ 。

流域顶部和两侧:采用对称边界条件(symmetry),等价于自由滑移的壁面。

建筑物表面和地面:采用无滑移的壁面条件(wall)。

计算采用 3D 单精度、分离式求解器,空气模型选用不可压缩的常密度空气模型,对流项的离散采用精度较高的二阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法。钝体绕流出现分离、再附、冲撞、环绕及旋涡等一系列复杂的流动,选用非平衡壁面函数(non equilibrium wall function)来模拟壁面附近复杂的流动现象。迭代的收敛标准为所有控制方程的相对迭代残余量均小于  $1 \times 10^{-4}$ ,且同时监测到的各表面压力系数基本不发生变化时,认为所得流场进入了稳态。

### 1.4 湍流模型

所模拟的流动为定常流动,选用标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型、Realizable  $k-\epsilon$  模型和 SST  $k-\omega$  模型。湍流度对结构所受静力风荷载的影响较小,而对脉动风载效应影响较大。在风场模拟中,我国现行规范还没有明确的湍流度要求,该文对 B 和 D 类风场的湍流强度,参考日本规范的湍流强度  $I$  取值如下<sup>[19-20]</sup>:

$$I = \begin{cases} I_0 & Z \leq Z_b \\ 0.1 \times \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{-\beta} & Z_b < Z \leq Z_g \end{cases} \quad (5)$$

式中:B类风场下, $I_0$  为 0.23, $\beta$  为 0.2, $Z_b$  取 5 m, $Z_g$  为 350 m;D类风场下, $I_0$  为 0.31, $\beta$  为 0.25, $Z_b$  为 5 m, $Z_g$  为 450 m。

计算中,来流湍流特性通过在进流处以直接给定湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$ (SST  $k-\omega$  模型中为耗

散率  $\omega$ )的方式给定入流处湍流参数, $k = 1.5(\overline{uI})^2$ , $\epsilon = 0.09^{0.75} k^{1.5}/l$  或  $\omega = k^{0.5}/(0.09^{0.25} l)$ , 式中, $l$  为湍流尺度。 $k$  和  $\epsilon$ (或  $\omega$ ) 值同样采用 UDF 编程与 Fluent 作接口实现。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 2/3H 高度处风压系数分布

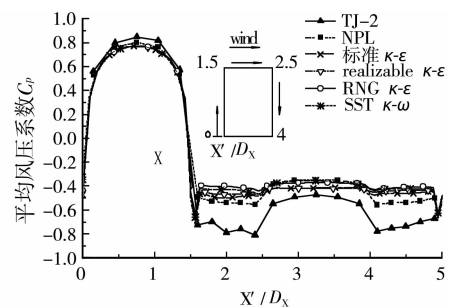
分别采用 FLUENT 软件提供的基于雷诺平均法(RANS)的 4 种常用的 2 方程涡粘湍流模型:标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型、Realizable  $k-\epsilon$  模型、和 SST  $k-\omega$  模型进行 CAARC 建筑风场的数值模拟,分别计算了  $0^\circ$  和  $45^\circ$  风向角下,B类和 D 类场地类别的风压系数。

无量纲的风压系数  $C_p$  以模型顶部高度  $H$  处来流动压作为无量纲化的参考风压,由下式计算:

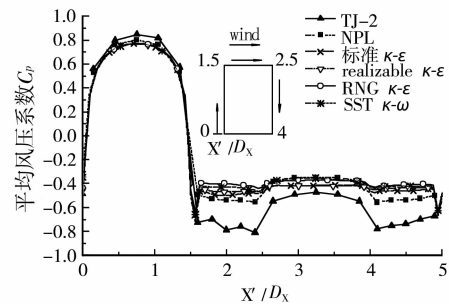
$$C_p = 2(P - P_0) / \rho U_0^2 \quad (6)$$

式中: $P$  为测点平均压力, $P_0$  为参考高度处的静压; $\rho$  为空气密度,取为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ;  $U_0$  为建筑物顶部的风速。

国际上通用的标准测点位于  $2/3H$ (122 m) 高度处。该文计算结果与与同济大学 TJ-2 风洞试验数据<sup>[16]</sup>在标准测点处的风压系数曲线比较见图 3-4。图中, $D_x$  为 CAARC 建筑的宽(即 30.48 m);NPL (national physical laboratory) 为英国国家物理实验室的试验结果。TJ-2 和 NPL 两次试验是理论上完全相同的,但是两者结果之间有一定差异,这表明风洞试验本身是有一定噪声水平的。



(a) D类风场



(b) B类风场

图 3  $0^\circ$  风向角下平均风压系数

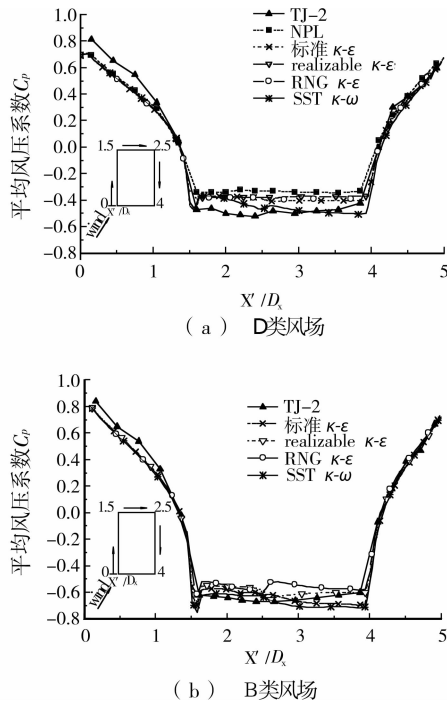


图 4 45°风向角下平均风压系数

由图 3—4 知,无论在正压区还是在负压区,各湍流模型的数值模拟结果与实验结果存在着一致的规律性,总体趋势均与试验结果吻合很好。各湍流模型之间的模拟结果差别不大。其中,对迎风面,0°

风向角,D类风场下,4种湍流模型计算的最大风压系数均为 0.77,分别比 TJ-2 和 NPL 试验结果低 9%和 3.8%;B类风场下,4种湍流模型计算的最大风压系数均为 0.86,比 TJ-2 试验结果低 3.4%。45°风向角下,建筑物为 2 个迎风面,数值模拟结果与 NPL 和 TJ-2 试验结果均吻合良好,相比之下更接近于 NPL 试验结果。

在侧面及背风面气流处于分离区,各湍流模型模拟结果与试验结果存在一定差异。0°风向角,D类风场下,各湍流模型的模拟结果更接近于 NPL 试验结果,在背风面数值模拟的平均风压系数介于 NPL 试验结果与 TJ-2 试验结果之间。在侧面,数值模拟的平均风压系数低于 TJ-2 和 NPL 试验结果;B类风场下,各湍流模型之间对于背风面的模拟结果比 TJ-2 试验结果低 25%左右。对于 45°风向角,D类风场下,各湍流模型模拟结果介于 TJ-2 与 NPL 试验结果之间,其中,数值模拟结果与 TJ-2 试验结果相差在 20%以内,均满足工程应用要求。

### 2.2 风压系数等值线

各湍流计算模型的迎风面、侧面、背风面和顶面的平均风压系数 Cp 等值线,见图 5。以 0°风向角 D类风场下的数值模拟结果为例,来比较各湍流模型间的差异。

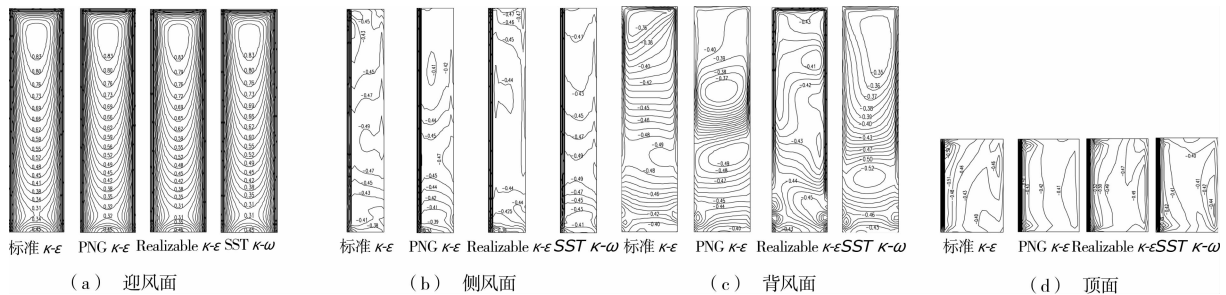


图 5 D类风场 0°风向角下表面平均风压系数计算结果

由图 5 知,在正面来流风力作用下,迎风面均受有正压力。此正压力在迎风面的中间偏上为最大,两边及底下最小。这是由于风速随着高度呈指数规律增加,在建筑物的底部风速相对较小,所以风压系数较小。建筑物的背风面全部承受负压力(吸力),一般两边略大、中间小,整个背面的负压分布是比较均

匀的。建筑物的侧面承受吸力,试验值大于计算值。

### 2.3 湍动能分布

建筑物顶部的流场比较复杂。图 6 分别显示了过建筑物中线的顶部和 2/3H 高度处的湍流动能 k 的分布图,湍动能 k 表示流体脉动程度的大小。

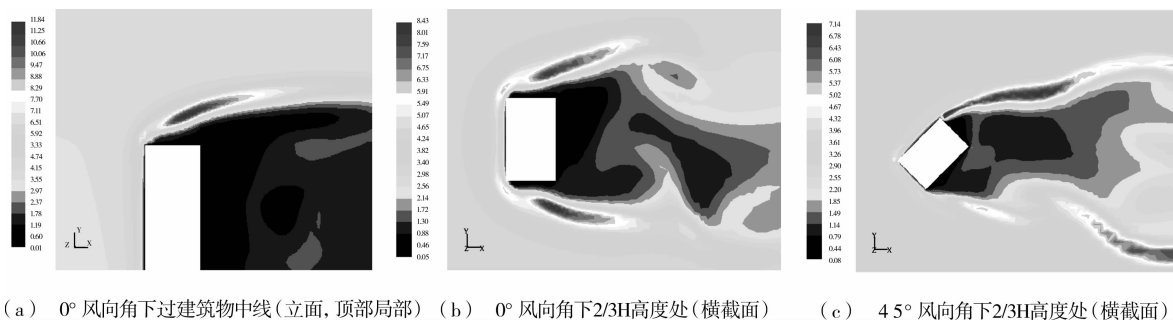


图 6 D类风场下 Realizable k-epsilon 模型湍动能 k 分布

由图6知,在建筑物迎风侧的边角处,气流分离严重,具有较高的湍动能,表明气流分离处的脉动程度较大。气流分离较严重的区域往往形成漩涡,可由图7和图8看出。

#### 2.4 速度分布与流场分析

当气流与迎风面垂直时,气流受阻后 $2/3$ 高度处速度矢量图见图7(a),如果气流风向与建筑物斜交时( $45^\circ$ 风向角),建筑物有2个迎风面,气流受阻后 $2/3$ 高度处速度矢量图见图7(b)。2种情况均在背风面产生了2个较大漩涡,从而引起吸力。图8为过建筑物中线的风速矢量图。均以D类风场可Realizable  $k-\epsilon$  模型计算结果为例。

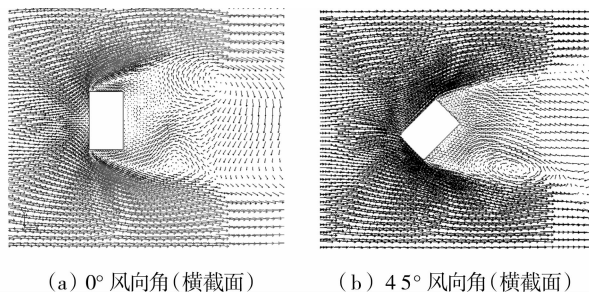


图7 D类风场 Realizable  $k-\epsilon$  模型 $2/3H$ 高度处速度分布

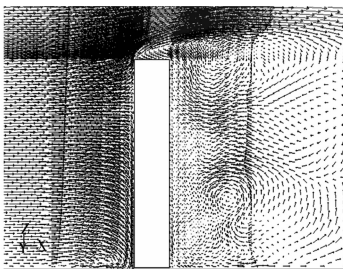


图8 D类风场 Realizable  $k-\epsilon$  模型过建筑物中线速度分布

流体流经建筑物绕流面时,发生了边界层分离现象。在正压区,流体的惯性力与压强差克服流体的粘性力使流体顺利地沿固壁往下游流动。在负压区,流体的惯性力不仅要克服粘性力还要克服负压强度所产生的逆压强,在一定条件下,固壁附近的流体质点会出现停滞不前,甚至是向上游移动的情况,即形成涡流。边界层分离将在建筑物的后部形成分离区和尾流。

由图8知,大约在 $2/3$ 高度处,气流有一正面停滞点,该点的速度方向垂直于正迎风面。在该点以上,流动上升并越过建筑物顶面,在该点以下,气流向下并流向地面,迎风面气流向下滚动,于是在建筑物迎风面紧靠地面形成了水平滚动,成为驻涡区,风压系数分布见图5(a)。在背风面沿建筑物高度方

向形成了上下2个较大的漩涡,风压系数分布见图5(c)。在建筑物屋面角部也产生了一定的漩涡,从而引起了吸力。总的来说,气流对正迎风面有向下流动的趋势,而且绕两侧和顶面流动。

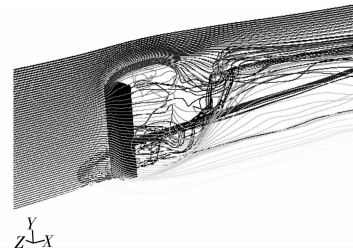


图9  $0^\circ$ 风向角D类风场 Realizable  $k-\epsilon$  模型对称面流线图

图9为 $0^\circ$ 风向角下D类风场 Realizable  $k-\epsilon$  计算模型对称面的风流线图。通过高层建筑风场流迹的显示,可以定性分析流场。从图9流迹显示可以看出,绕方柱的流动结构是高度复杂的,充满着冲撞、分离、涡旋、环绕及回流。绕经方柱上方的流线向下卷起涡旋,底端的流线则向上卷起涡旋,相互交织在一起向下流泄出,因此方柱的下游流场是高度涡旋和紊乱,这也是方柱分离区数值模拟精度不高的原因之一。

### 3 结论

采用基于雷诺平均(RANS)的标准 $k-\epsilon$ 等湍流模型对CAARC标模的高层建筑进行了三维定常风场的数值模拟,并将数值模拟结果与同济大学TJ-2和NPL风洞试验结果进行了比较分析。通过该分析可以得到以下结论:

1)大气边界层中钝体绕流是非常复杂的,充满着冲撞、分离、涡旋、环绕及回流等现象。数值模拟能够较好地反映高层建筑周围风环境的绕流特性和表面风压的分布情况。模拟结果与风洞试验结果总体上吻合较好。

2)基于雷诺平均的标准 $k-\epsilon$ 、Realizable  $k-\epsilon$ 、RNG  $k-\epsilon$ 和SST  $k-\omega$ 湍流模型均能给出满足工程应用精度的结果。其中,在迎风面时,与试验结果吻合良好,与TJ-2试验结果相差在10%以内;在侧风面和背风面时,数值模拟结果介于NPL与TJ-2试验结果之间。均能满足工程应用的精度要求。

3)迎风面均受有正压力,在迎风面的中间偏上为最大,两边及底下最小。建筑物的背风面全部承受负压力(吸力),一般两边略大、中间小,整个背面的负压分布是比较均匀的。建筑物的侧面承受吸

力,试验值大于计算值。

4)数值风洞具有模拟真实风环境的能力,可以构造与建筑物实际尺寸相当的计算模型,这样可以按实际的风环境进行仿真和模拟,避免了风洞试验只能进行缩尺实验的不足。因此,数值风洞技术有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] MURAKAMI S. Overview of turbulence models applied in CWE-1997 [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 74(4): 1-24.
- [2] AHAMAD S, KUMAR K. Interference effects on wind loads on low-rise hip roof buildings [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23: 1577-1589.
- [3] MURAKAMI S, MOCHIDA A. 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the  $k-\epsilon$  model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 31: 283-303.
- [4] BASKARAN A, STATHOPOULOS T. Computational evaluation of wind effects on buildings [J]. *Building and Environment*, 1989, 24(4): 325-333.
- [5] TANG U F, KWOK K C S. Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(14): 1299-1314.
- [6] THEPMONGKOL S, WOOD G S, KWOK K C S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(14): 1807-1815.
- [7] 周大伟, 黄本才, 徐再根, 等. 金茂大厦平均风压及风环境干扰数值风洞模拟 [J]. *建筑结构*, 2005, 35(12): 74-76.  
ZHOU DA-WEI, HUANG BEN-CAI, XU ZAI-GEN, et al. Numerical Wind tunnel simulation of mean pressure on jinmao mansion and the interference of wind environment [J]. *Building Structure*, 2005, 35(12): 74-76.
- [8] 苏国, 陈水福. 复杂体型高层建筑表面风压及周围风环境的数值模拟 [J]. *工程力学*, 2006, 23(8): 144-149.  
SU GUO, CHEN SHUI-FU. Numerical Simulation of wind pressures and wind environment around a complex-shaped high-rised building [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(8): 144-149.
- [9] 楼文娟, 孙斌, 卢旦, 等. 复杂型体悬挑屋盖风荷载风洞试验与数值模拟 [J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(1): 107-118.  
LOU WEN-JUAN, SUN BIN, LU DAN, et al. Wind tunnel test and numerical simulation of wind loads on complex cantilevered roofs [J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(1): 107-118.
- [10] 林斌, 孙晓颖, 武岳, 等. 大庆石油学院体育馆屋面风荷载的风洞试验及 CFD 数值模拟 [J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2006, 22(3): 357-361.  
LIN BIN, SUN XIAO-YING, WU YUE, et al. Wind tunnel test and CFD numerical simulation of wind-induced loads on gymnasium roof of daqing petroleum institute [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science*, 2006, 22(3): 357-361.
- [11] 张敏, 楼文娟, 何鸽俊, 等. 群体高层建筑风荷载干扰效应的数值研究 [J]. *工程力学*, 2008, 25(1): 179-185.  
ZHANG MIN, LOU WEN-JUAN, HE GE-JUN, et al. Numerical study on interference effects of wind loads about a cluster of tall buildings [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(1): 179-185.
- [12] 周月庭, 吕令毅. 高层建筑三维非定常风场并行计算的数值模拟 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, 23(1): 42-46.  
ZHOU YUE-TING, LU LING-YI. Numerical Simulation of 3-D Unsteady Wind Field Around High-rise Building on Parallel Computation [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2007, 23(1): 42-46.
- [13] 张兆顺. 湍流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [14] YAKHOT V, ORZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory [J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 3-11.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [16] 罗攀. 基于标准模型的风洞试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [17] Parametric study on the along-wind response of the CAARC building to downbursts in the time domain [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(9): 703-724.
- [18] GB 50009-2001 建筑结构荷载规范 [S].
- [19] AIJ. Recommendations for Loads on Buildings [S]. 1996.
- [20] 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.

(编辑 胡玲)