



# 建筑物表面风压以及风场的数值模拟与 风洞实验研究

姜瑜君<sup>①</sup> 刘辉志<sup>②\*</sup> 张伯寅<sup>③</sup> 朱凤荣<sup>③</sup> 梁 彬<sup>③</sup> 桑建国<sup>④</sup>

(① 浙江省气象科学研究所, 杭州 310017; ② 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; ③ 北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871; ④ 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

**摘要** 利用自主开发的模拟建筑物周围风环境数值模式“北京大学大气环境模式”(Peking University Model of Atmospheric Environment, PUMA), 通过求解非静力动力学方程, 模拟了一个特殊塔型结构建筑物周围的空间流场以及建筑物表面风压系数的分布特征, 同时与风洞实验的数据进行了对比, 对该拟建项目可能导致的风环境问题以及建筑表面风荷载进行了评估. 模拟结果与实验数据的比较显示, 两者在速度场与建筑表面风压系数具有较好的吻合度, 体现了该模式在风场以及压力场计算方面的良好性能. 但通过与实验结果的对比不难发现, 模式的结果在某些情况下与试验存在较大的误差. 造成这种偏差的原因, 一方面是模式现有的分辨率为水平方向 2 m, 垂直方向 3 m, 难以将塔型结构建筑物表面的气压变化完全精确的展现出来; 另一方面, 固壁上格点的气压和周边空间气压分布之间关系的参数化方案, 仍需要进一步改进. 从整体来看, 该模式模拟结果与风洞实验基本吻合, 可以较好计算特殊形状钝体结构建筑物导致的风场以及风压分布情况. 研究表明该数值模式可用以评估建筑物的表面风压及周围的风环境, 在建筑物的风工程项目中具有良好的应用前景.

**关键词** 塔型结构建筑物 风荷载 风压系数 非静力数值模式

风是建筑物设计以及城市规划中需要慎重考虑的气象因子之一. 大型高层建筑的修建, 既需要建筑技术与结构材料的保障, 同时也应该具有足够的抗风强度, 因而设计者需要考虑风对结构体的动态载重效应. 建筑物在外界强风来流的作用下可能导致的摆动、震动等结构安全方面的问题, 一直都是计算风工程领域的重要研究课题之一<sup>[1,2]</sup>. 随着科技水平的提高和人们生活的不断改善, 建筑物所导致的行人风环境问题, 也开始逐渐得到大家的重视<sup>[3,4]</sup>.

建筑物周围的流场结构受到诸多因素的影响,

如背景风场的特性、建筑物本身的几何形状以及邻近的建筑群的影响等<sup>[5,6]</sup>. 由于钝体绕流的阻塞作用而导致的下冲、涡旋、角隅流以及尾流、穿堂风等效应, 建筑物附近的流场就会变得相当的复杂. 上述诸多因素的存在, 往往会导致在高层建筑物附近产生过高的局地风速, 从而给在其周围活动的行人造成不舒适, 甚至可能存在行人被强风刮倒致伤的安全隐患<sup>[7]</sup>. 建筑物导致的不良行人风环境会有损于建筑物的使用舒适度和住居环境, 因此设计师们都希望能够在设计阶段就对建筑物周围的风环境问题进行评

收稿日期: 2007-04-30; 接受日期: 2007-07-16

国家自然科学基金(批准号: 40575069)和浙江省气象科技开放研究专项(编号: KF2006002)资助

\* 联系人, E-mail: [huizhil@mail.iap.ac.cn](mailto:huizhil@mail.iap.ac.cn)

估,以作适当修改或采取一些可行的措施,从而提供更加舒适、安全的生活环境.如今,大部分先进国家都已开始立法要求对高大建筑物或结构体周围的风场作环境影响评价.即在项目兴建前的概念、规划与设计阶段,要预先评估建筑物的风荷载以及周边的风场特征,对其建成后可能导致的风环境问题作出科学的评价<sup>[8,9]</sup>.

建筑物风环境的研究方法一般包括现场观测、物理模拟实验如风洞、水槽和水洞实验等以及数值模拟计算<sup>[10~13]</sup>.随着计算机硬件条件的飞速发展,应用计算流体力学方法对城市边界层内建筑结构周围流场的模拟,在最近十几年中取得了很大的进展<sup>[14,15]</sup>,尤其是在计算风工程领域取得了显著的进步,同时也促进了计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)软件的发展.

CFD 软件主要被用于解决工程中的流体和传热问题,由于具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能,目前被广泛应用到计算风工程领域中,如对于高层建筑物单体或者建筑群的周边流场的数值模拟以及相应的风压、风荷载的研究.由于它可以精确的对建筑群或者结构体所致的流场进行数值模拟<sup>[16]</sup>,其模拟结果被广泛利用作为行人风环境的评估参考<sup>[6]</sup>.此外 CFD 软件还可以计算人体表面及其附近空间微尺度的风环境以及热力环境特征<sup>[17]</sup>以及各种尺度的流场分析<sup>[18]</sup>,也可以对建筑物内部污染物扩散进行合理的计算模拟<sup>[19]</sup>,甚至对大型火灾造成的影响也能进行有效的模拟<sup>[20]</sup>,研究表明,CFD 软件在目前的城市环境问题研究当中有着广泛的应用前景.

目前的 CFD 软件功能已经十分强大,但并不能很好的解决大气科学领域的某些特殊问题,如太阳辐射所致的局地热力差异对建筑物周围风环境的影响,局地大气以及地表热力环境的昼夜变化所导致的温度层结等.因此国内外研究城市气候的学者们发展了能够用于研究建筑物风环境和热力环境的大气边界层模式,如蒋维楣、张宁、徐敏等<sup>[21~24]</sup>利用大涡模拟技术(LES)对小尺度建筑物结构体所致流场以及相应的污染物扩散进行了有效的数值模拟.苗世光等<sup>[25]</sup>则在此基础上,建立了一个针对城市小区的气象以及污染扩散的数值模式,并用于小区大气环境的评估,结合观测结果为小区的规划建设提供科

学合理的参考意见.这一类自主开发的模式,由于可以灵活地结合能量平衡、污染物输送等模式,在大气科学研究领域存在较好的发展空间.

除了 LES 方法以外,RANS(Reynolds-averaged Navier-stokes equation)方法也被广泛应用到城市边界层的数值模拟当中.桑建国利用该方法建立一个大气环境模式 PUMA,并用以计算小尺度的街谷热力环境和流场结构<sup>[26]</sup>,王宝民等<sup>[27,28]</sup>、姜瑜君等<sup>[29]</sup>、刘辉志等<sup>[30]</sup>利用该模式,对高层建筑的周边流场进行了模拟,并结合风洞实验的结果对一些拟建的高层建筑进行了合理的风环境评估.

对正在拟建的项目而言,进行事先的观测是不可能的,一个比较可行的方案就是对规划区域的模型进行一些合理的物理实验,如风洞、水槽、水洞实验等.将物理模拟实验数据与数值模拟相结合,对其结果进行相互对比分析,从而对拟建的项目风环境进行评价,这是目前比较理想而且切实可行的研究手段之一.本文拟采用自主开发的数值模式 PUMA,对一个特殊造型的建筑物周边流场结构以及建筑各表面风荷载进行数值计算,并结合风洞实验数据进行对比分析,为该建筑的设计方案提供风荷载以及风环境的科学评估.

## 1 风洞实验与数值模式

### 1.1 风洞实验

实验模拟的目标建筑物为法门寺当时拟建的合十舍利塔,法门寺位于陕西省宝鸡地区扶风县城以北 10 km 处的法门镇,东距西安市 110 km,西至宝鸡市 90 km,是我国古代著名的佛教寺院.1987 年法门寺地宫发掘,使法门寺成为佛教界及学术界的瞩目之地.正在拟建的法门寺文化区,南北长 2165 m,东西宽 952 m,总占地面积 3092 亩<sup>1)</sup>,其中法门寺合十舍利塔,总高 147 m,宽 50 m,呈合十双手的特殊造型,居于该文化区的中央.图 1 给出了法门寺合十舍利塔设计效果图.

风洞模拟实验是在北京大学环境学院大气环境模拟国家重点实验室的环境风洞中进行.该环境风洞为直流、吸式,实验段长 32.0 m,其风洞实验截面积为 2 m×3 m,流速范围为 1.0~21 m/s.缩尺比例为 1:200 的刚性模型被安置在风洞试验段的转盘上,在试验中通过转盘的旋转以变更来流风向,来流风的

1) 1 公顷=10<sup>2</sup> m<sup>2</sup>



图 1 法门寺合十舍利塔设计效果图

特征则依据建筑物所在地的地形地貌条件而定. 风洞试验过程中, 我们采用了毕托管、微压计、热线风速仪等测量仪器, 测量了模型周围速度的空间分布以及模型表面的压力分布特性.

## 1.2 数值模式

由北京大学开发的“北京大学大气环境模式”(Peking University Model of Atmospheric Environment, PUMA)可以对中尺度、小尺度和微尺度的大气环境进行模拟, 并在多项研究课题中得到应用. 此次风环境评价采用该数值模式中的城市边界层模式, 对流场的空间结构进行模拟, 并和风洞实验结果进行比较验证. 由于一般风工程所涉及的问题大都发生在较强的来流风速下, 且在近地表上数百米高度的大气边界层范围之内; 在风速较大的情况下, 大气机械湍流作用通常超过热力作用, 所以本模拟暂不考虑热力作用.

在大气边界层中, 大气运动的平均 Navier-Stokes 方程为

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (R_{ij}), \quad (2)$$

其中  $u_i$  为在  $x_i$  方向上的平均速度分量 ( $i = 1, 2, 3$ ),  $p$  为扰动气压,  $\rho$  为空气密度, Reynolds 应力  $R_{ij} = \overline{u_i u_j}$  是作用于空气块上的应力项. 应力  $R_{ij}$  按湍流闭合假定, 可表示成为

$$R_{ij} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2K S_{ij}, \quad (3)$$

其中  $S_{ij}$  为平均流场的应变率,  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ .

湍流粘性系数  $K$  可用湍流动能  $k$  和湍流动能耗散率  $\varepsilon$ , 表示成为

$$K = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

其中  $C_\mu$  为闭合系数.

$k$  和  $\varepsilon$  分别由下列方程给出

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \varepsilon, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

其中半经验的系数取值如下<sup>[31]</sup>:

$$c_\mu = 0.09, \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92, \\ \sigma_\mu = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

在本次计算中, 入流边条件可取为定常的, 设平均风沿  $x$  轴方向, 取

$$u(z) = u_{10} (z/10)^\alpha, \quad (7)$$

其中  $u_{10}$  为 10 m 高处风速, 幂指数  $\alpha$  为稳定性和粗糙度的函数, 在风工程领域考虑较多的是大风情况, 在这种大气条件下, 稳定度一般为中性, 其数值通常由风洞实验数据校正得到, 在本次实验中  $\alpha = 0.18$ .

在出流边界, 取自由流边条件

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

在钝体表面如墙面、路面和屋顶, 取非滑动边条件

$$u = 0, v = 0, \frac{\partial k}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

其中  $n$  为固体表面的法线方向.

由于计算精度要求和时间的限制, 本文只针对塔基的主体部分进行了模拟, 模拟区域为: 东西方向 144 m, 南北方 112 m, 垂直方向 150 m; 水平网格为 2 m, 垂直为 3 m, 总格点数为  $73 \times 57 \times 51$ . 时间步长为 0.04 s, 计算时间为 20 s, 此时基于 RANS 计算的流场趋于稳定.

## 2 结果分析和讨论

图 2 给出了基于当地 30 a(1971~2000)气象资料统计结果所得宝鸡地区以及扶风的风频分布情况, 图中可以看到, 扶风以及整个宝鸡地区, 东、西风发生的频率比较高, 为 12%, 其次是东南风 10%, 而最大风速出现在北风的情况, 达 14 m/s. 由于塔身表面拟采用玻璃帷幕, 因此在大风天气条件下, 塔身表面的风压、风荷载的分布特性对设计安全来说具有重要的参考意义. 鉴于该建筑沿着正北轴线东西对称分布, 本数值模拟对东风以及北风两种来流情况分别进行了计算(两种来流风速大小一样), 并与相应的风洞实验数据进行对比.

数值模拟以及风洞实验中, 时均压力系数(平均压力系数)通过下式获得:

$$\bar{C}_{pi} = \frac{\bar{P}_i - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2},$$

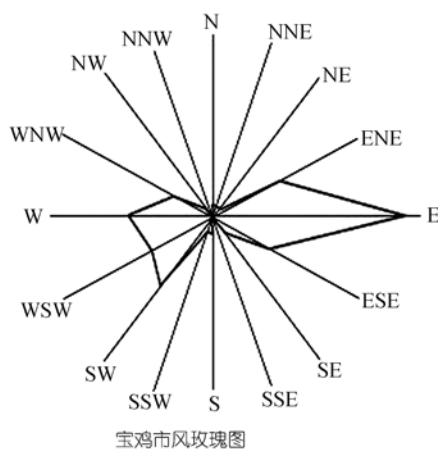


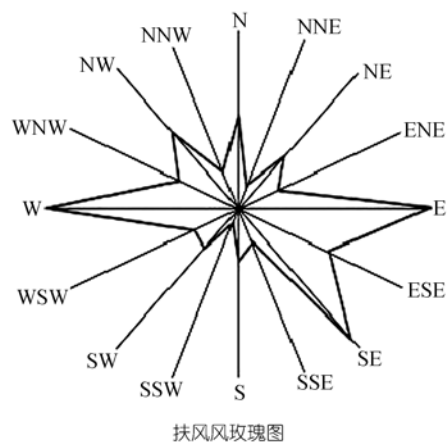
图 2 舍利塔建筑设计所在地 1971~2000 年平均风的玫瑰图

其中:  $\bar{P}_i$ —测点  $i$  处的时均值,  $P_{ref}$ —参考点静压,  $\rho V_{ref}^2 / 2$ —参考点处动压(即总压-静压),  $\rho$ —来流密度,  $V_{ref}$ —参考点风速.

### 2.1 东风

由于东风来流风速较大, 且发生频率较高, 塔身东侧外表面的风压分布情况对于结构设计建设就很重要, 因而本次风洞试验对这种来流情况下的塔身风荷载情况进行了相关的数据采样. 图 3 是风洞实验得到的塔身各个表面的平均风压系数分布情况(来流速度为 9.6 m/s, 参考高度为 10 m). 从图上可以看出, 在东风来流情况下, 东侧外表面为迎风面, 由于风攻角较大, 其外表面风压普遍为正值. 其数值在中心最大, 大约 1.3~2.3, 外围部分则在 0.3~1.3, 边缘的值在  $-0.6 \sim 0.3$ , 风压系数分布呈现辐射状递减, 而塔身其他各个表面由于处在背风区, 风压则呈现负值.

图 4 则是东侧迎风面风压分布的数值模拟结果与实验的对比情况. 从模拟的结果来看, 风压系数分布情况、以及相应区域的数值大小, 虽然和测量结果存在一定的差距, 但是其分布的趋势和数值大小还是比较接近的. 由于测量结果图给出的风压分布图分辨率比较低, 高值区为 1.3~2.3, 一个标尺的量度在 1 左右, 因此和数值模拟结果相比存在一定的差距也是情理之中. 不过从计算整体效果看, 风洞实验的数据与数值模拟的结果是比较接近的. 又由于在实际的钝体绕流中, 在高雷诺数情况下, 建筑物边缘以及迎风面、背风面的流场结构是复杂变化的, 各种小尺度的扰动以及之间的相互作用, 使得靠近固壁面范围内的流场结构呈现空间的不均匀性和时间的非定





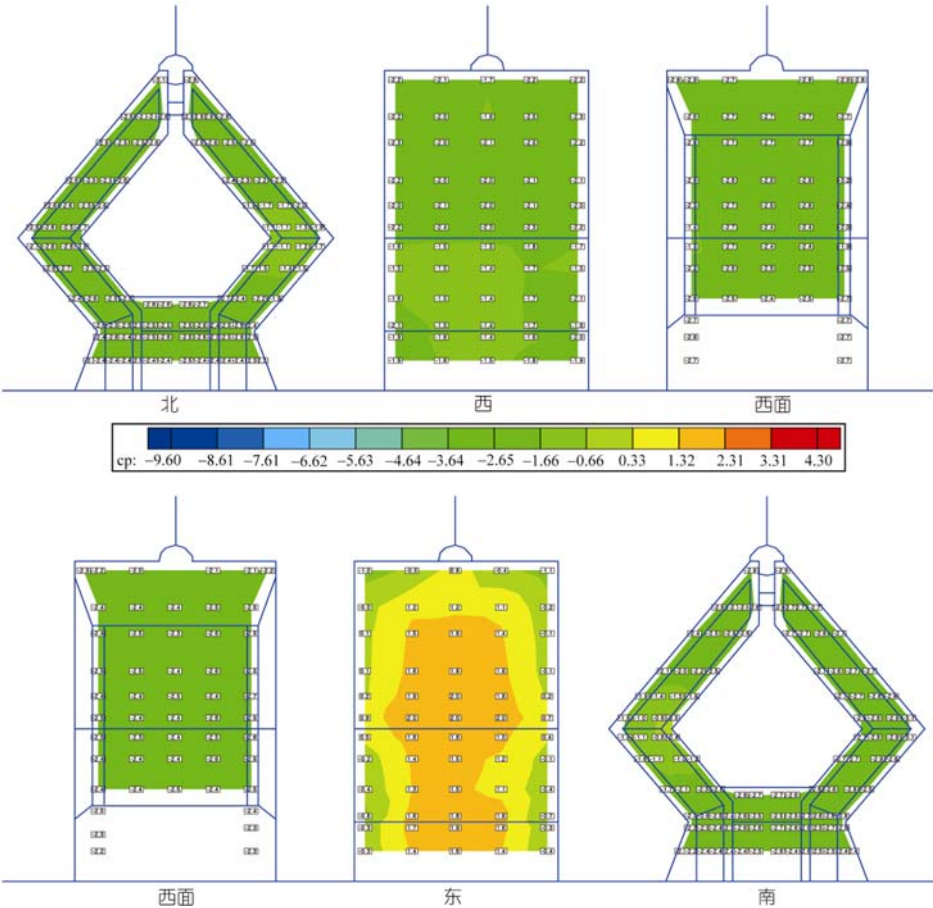


图 3 东风来流, 风洞实验得到的塔身表面的风压系数分布情况

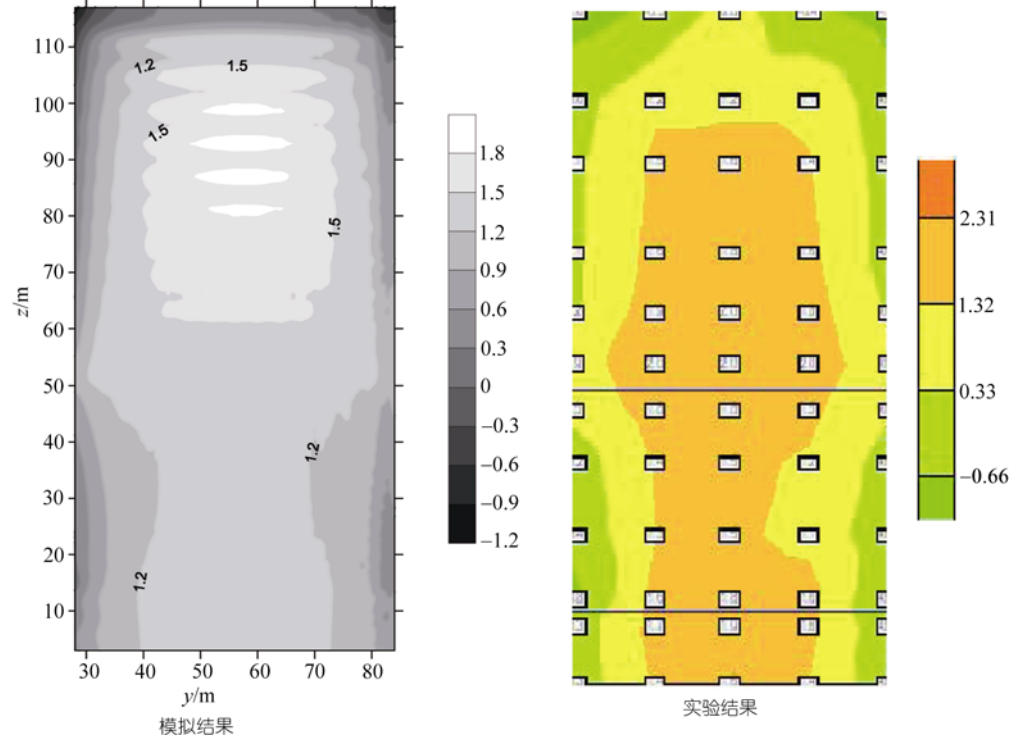


图 4 东风来流, 迎风面的表面风压系数分布

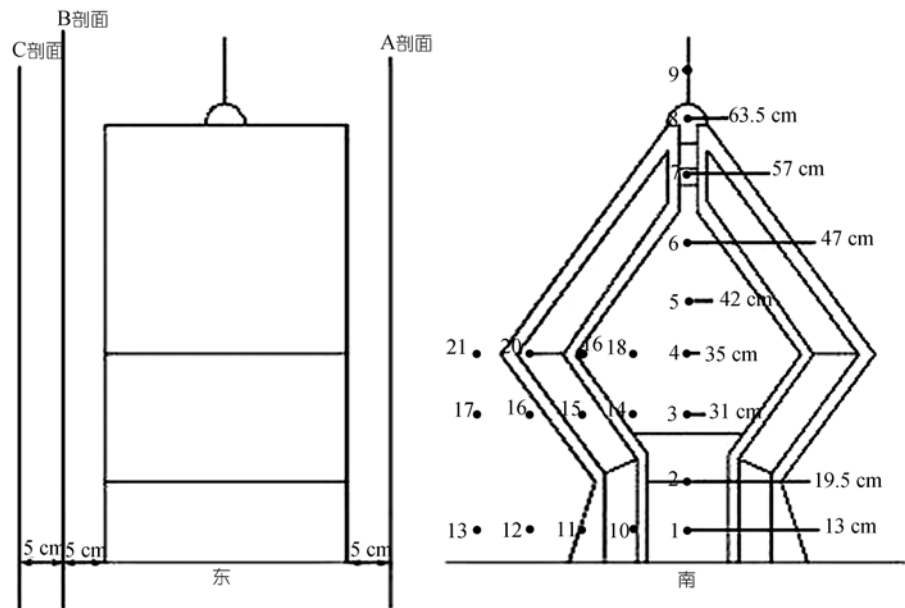


图 5 实验测点编号分布  
A 剖面为迎风面; B, C 剖面为背风面; 模型比例 1:200

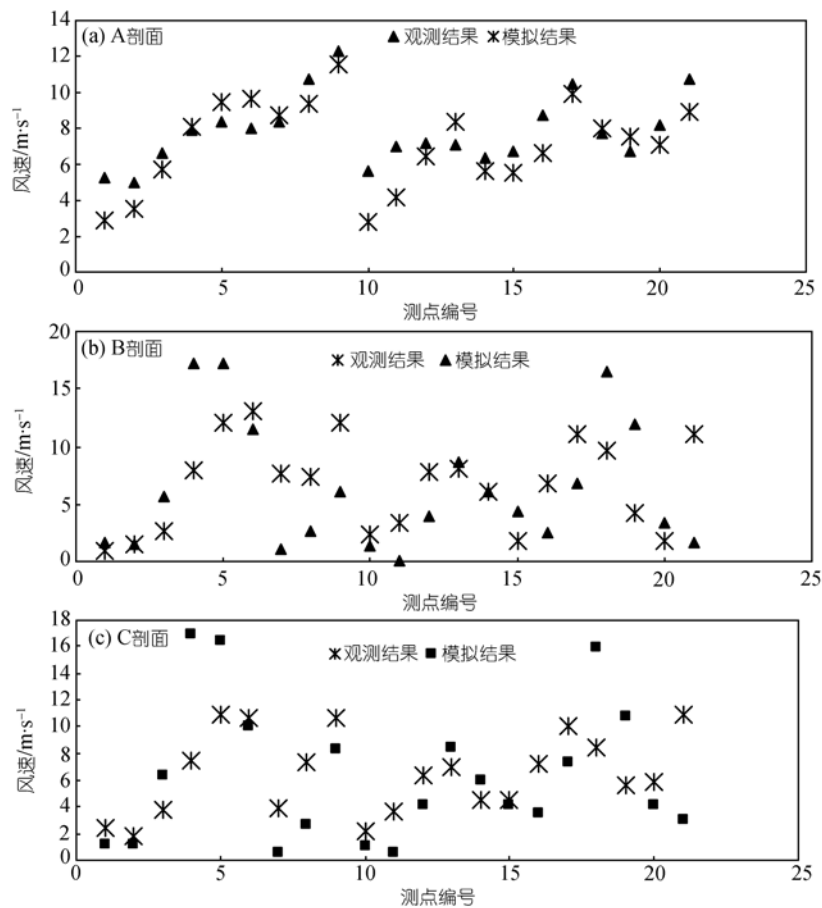


图 6  
(a), (b), (c)为三个剖面上模拟和实验数据的对比图

常性. 图 3 显示的是对采样的数据进行一定时间平均的结果, 而用 RANS 得到的模拟结果, 虽然可以得到一个平均化的准定常流场形态, 但是由于扰动气压随时间变化是持续而又无序的, 加上本次数值实验的网格距较大, 因此空间分辨率比较低, 也会导致模拟和实验的数据存在一定的偏离.

## 2.2 北风

北风是出现最高风速值的来流情况, 虽然发生频率较低, 由于最大风速达到 14 m/s, 因此有可能对塔身建筑造成不安全的因素, 也会在近地面形成局地强风, 对行人活动造成不便. 因此我们风洞实验对这种来流情况进行局部空间点的风速测量, 同时也与数值模拟的结果作了相应的比较分析.

图 5 显示的是, 风洞实验中风场测点的编号情况,

此次实验来流风速为 9.6 m/s(参考高度 10 m 处的风速, 与东风情形一样). 图 6 是图 5 中的 A, B 和 C 三个剖面上的各个测点的实验数据与相应的模拟结果的对比情况. 从结果来看, 数值模拟的结果还比较理想, 尤其在迎风面 A 的模拟上, 与风洞实验的数据有着较高的吻合度, 但在迎风面的 1, 10 和 11 三个编号位置, 模拟与实测存在一定的误差, 这三点处于建筑基座迎风面底部, 靠近表面, 风场变化较大而且绕流区的气流结构比较复杂, 在网格距较大的情况下, 会存在一定的出入. 在穿越塔身中间的结构以后, 气流变得比较复杂, 加之数值模拟的空间分辨率相对偏低, 故而与试验数据的偏差变大, 如 16, 17, 18 和 21 等处于建筑物边缘的测点, 误差较大. 但从 A, B 和 C 3 个剖面的整体结果对比来看, 现有的数值模式,

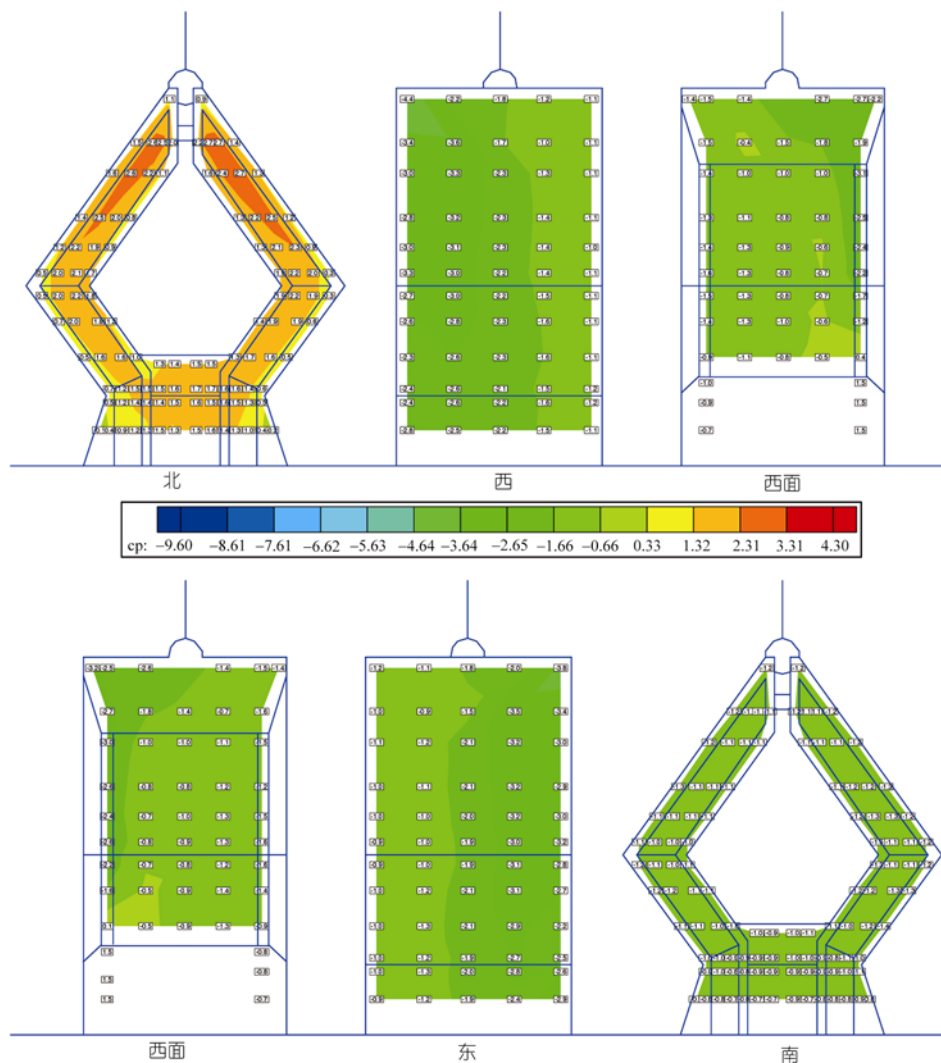


图 7 北风来流情况下, 塔身各表面的压力系数分布的风洞实验结果

在流场计算方面,可以较好的模拟出复杂建筑物造成的空间速度场的分布情况,具有较高的可信度。

图 7 显示的是北风来流情况下,风洞实验得到的塔身压力系数分布情况。从图上可以看出,塔身正北面与来流形成  $90^\circ$  的风攻角,因而表面的风压系数较高,其高值区的分布呈现对称钝三角,最大值在 2.3 ~ 3.3 之间,气流对内侧表面的冲击形成的系数较低,大致在 1.3 ~ 2.3 之间,在图 8 我们也可以明显的发现这个规律。塔身其他表面由于大部分处于背风区域,因此压力系数整体呈现为负压,数值值大概在 -1.6 ~ -0.6 之间。

图 9 是北风来流情况下,45 m 高处(即设计方案中中间小塔高度)的水平流场示意图。从图中可以看出,流场呈东西对称分布,佛塔结构由于存在对称的水平梯形截面,北端内表面与北风来流形成大致  $45^\circ$  的风攻角,因此在西内侧表面和东内侧表面的北端会有正压值存在,而南端由于气流离开固壁面,故而形成负压,这种分布在图 7 以及图 10 都可以明显的看到。而东侧和西侧外表面,由于气流方向大都与固壁面背离或风攻角小且风速较低,因此这两个外表面的风压系数整体呈现为负压,其分布呈现由北向

南递减的负压带状分布图案,这种分布在图 7 以及图 11 都可以明显的看出,实际上这种分布趋势和气流流动与固壁面的背离以及风速值大小的变化是吻合的。

### 3 结论

从本文的模拟结果来看,基于不可压缩流体连续方程、Reynolds 平均动量方程以及  $k-\varepsilon$  湍流闭合方案的数值模式 PUMA 城市气候模式,可以对塔形建筑物表面风压系数分布进行合理的模拟,与实验的数据相比显示,速度场与表面风压系数具有较好的吻合度,体现了在该模式在风场以及压力场计算方面的良好性能。但也存在一定的问题,需要加强和改进。

在结果显示方面,由于分辨率以及相应的图象显示软件的开发缺乏,自主开发的模式,在这方面,功能低于 CFD 的各种商业软件,但是,自主开发的软件,可移植性程度高,可以灵活地添加大气辐射、污染物输送等模块,因此在大气科学研究领域有着比较广泛的应用前景。

与实验结果的对比可以看出,模式的结果在一

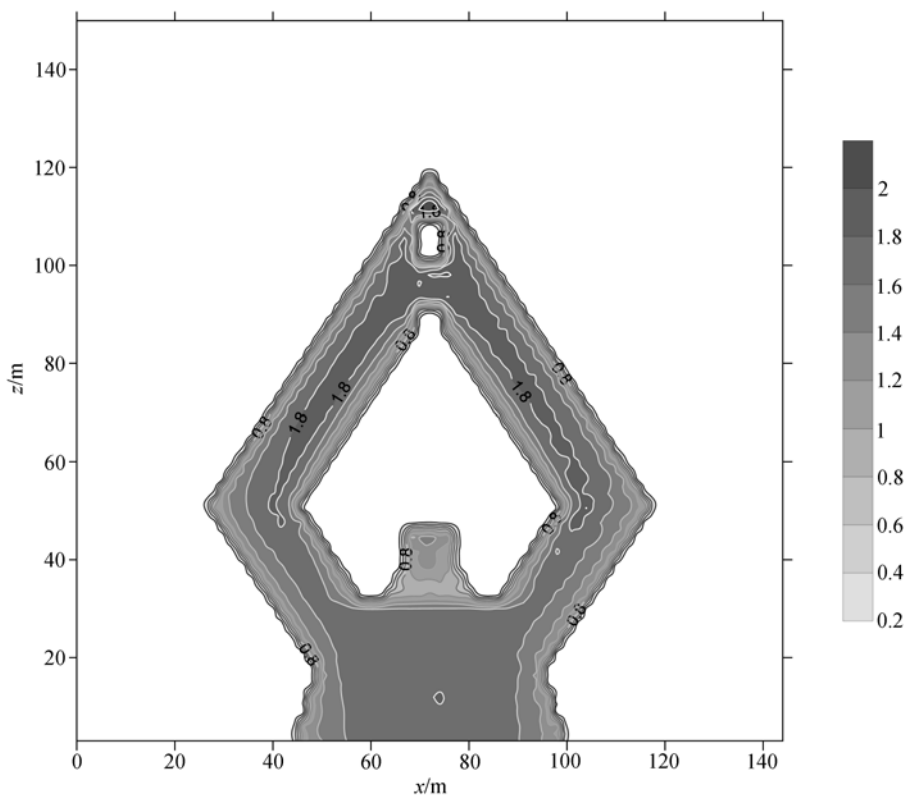


图 8 北风入流,数值模拟的塔身北侧表面的风压分布情况



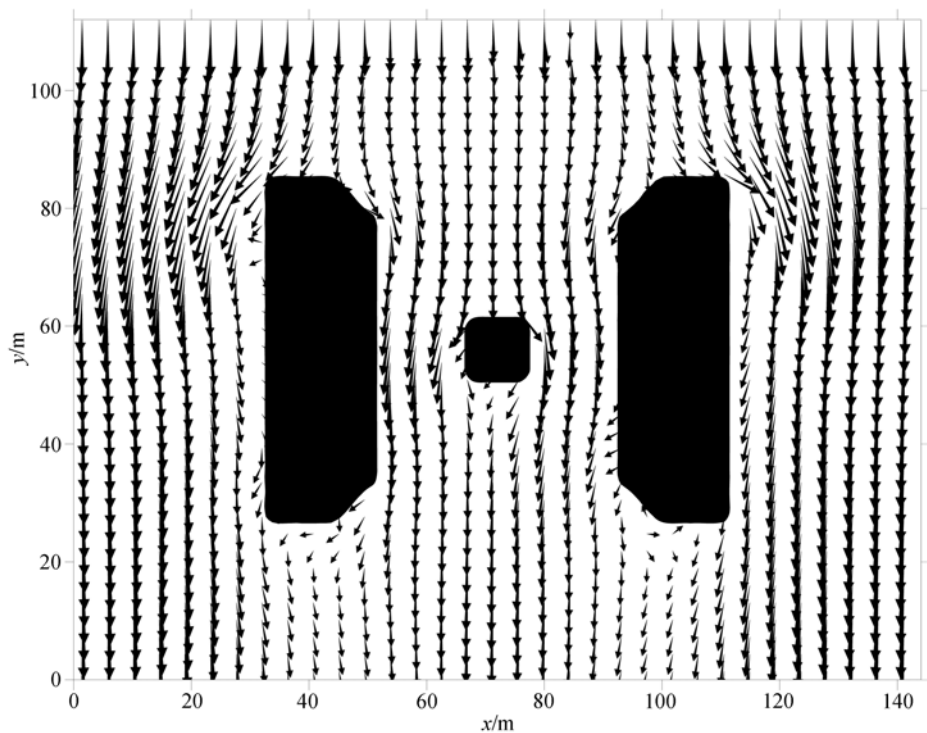


图 9 45 m 高度的水平流场示意图

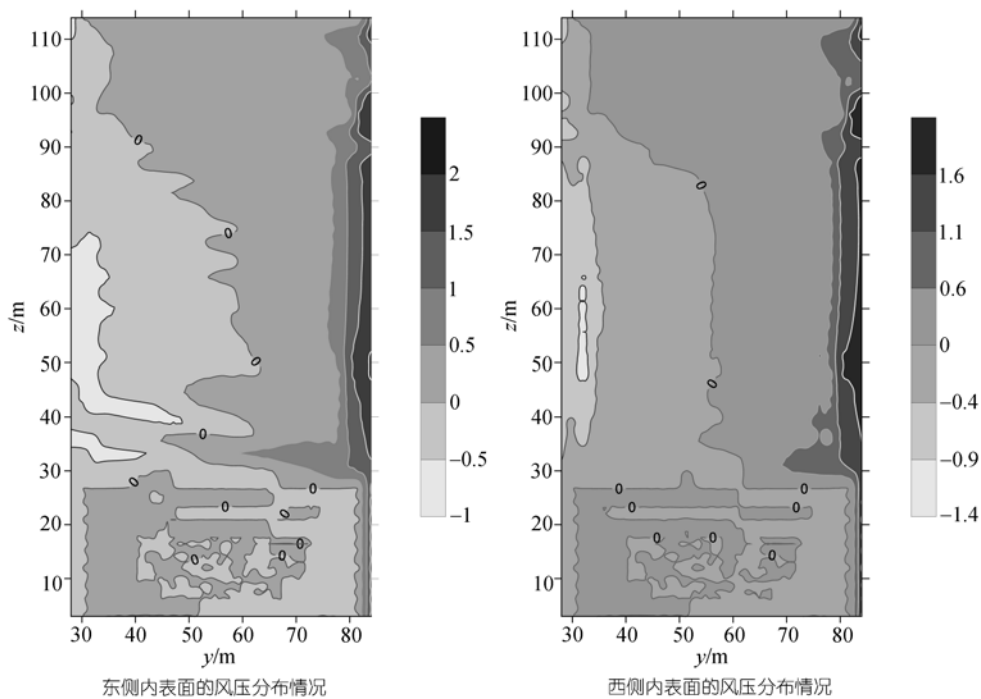


图 10 数值模拟的东西侧内表面的风压分布结果

定的地方, 存在较大的误差, 比如在北风来流情况下, 东西两侧外表面的风压分布, 计算模拟的结果就和实验存在一定的区别. 造成这种偏差, 一方面是模式现有的分辨率为水平 2 m、垂直 3 m, 这种网格距, 比

较难以将塔型建筑物表面的气压变化精确的展现出来, 当然网格分辨率的提高, 将大大增加计算机计算量, 这也是下一步工作的重点. 另一方面, 固壁面上格点的气压和周边空间气压分布之间关系的参数化

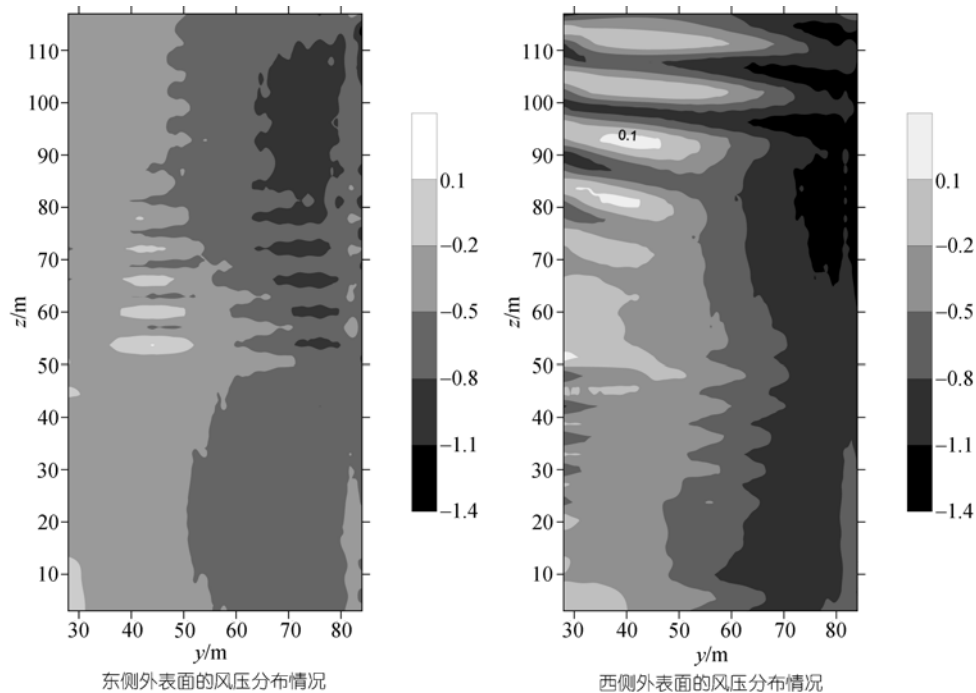


图 11 数值模拟的东西侧外表面的风压分布结果

方案, 仍需要进一步改进。

在差分格式上, 如果采用高分辨率的有限元网格, 或者在局地采用细网格的方法, 那么比较好的方案是采用隐格式进行差分迭代运算, 但是隐格式所带来的较大耗散, 会对计算结果造成不良的影响, 尤其在大规模的小区流场计算方面, 人为耗散会导致内部流速过低, 与实验数据的偏差较大的结果。如何选择合适的差分方法, 是该模式以后改进的重点之一。

结果表明, 现有的模式 PUMA, 在计算流场和风压分布方面, 具有较好的精确度和可信度, 适用于对拟建的建筑物或结构体进行相关的风环境以及风荷载进行数值计算, 并结合相应的实验结果, 对建设方案提出合理的建议与评估。

### 参 考 文 献

- 1 Murakami S, Mochida A, Kondo K, et al. Development of new  $k-\epsilon$  model for flow and pressure fields around bluff body. *J Wind Eng Ind Aero*, 1997, (67-68): 169—182
- 2 Cermak J E. Progress in physical modeling for wind engineering. *J Wind Eng Ind Aero*, 1995, (54-55): 439—455
- 3 Murakami S, Oka R, Mochida A, et al. CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. *J Wind Eng Ind Aero*, 1999, 81: 57—81[DOI]
- 4 Plate E J. Methods of investigating urban wind fields-physical models. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3981—3989[DOI]
- 5 Craig K J, de Kock D J, Snyman J A. Minimizing the effect of automotive pollution in urban geometry using mathematical optimization. *Atmos Environ*, 2001, 35: 579—587[DOI]
- 6 He J A, Charles C S Song. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. *J Wind Eng Ind Aero*, 1999, 81: 295—309[DOI]
- 7 Richard M. Politics of pedestrian level urban wind controls. *Build Environ*, 1989, 24: 291—295[DOI]
- 8 White B R. Analysis and wind tunnel simulation of pedestrian-level winds in San Francisco. *J Wind Eng Ind Aero*, 1992, 41: 2353—2364[DOI]
- 9 ASCE, Wind tunnel studies of buildings and structures. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, ASCE, Reston, Virginia, 1999, 67. 207
- 10 Cermak J E. Aerodynamics of buildings. *Annu Rev Fluid Mech*, 1976, 8: 75—106[DOI]
- 11 Hunt J C R, Poulton E C, Mumford. The effects of wind on people: New criteria base on wind tunnel experiments. *Build Environ*, 1976, 2: 15—28[DOI]
- 12 Peterka J A. Selection of local peak pressure coefficients for wind-tunnel studies of buildings. *J Wind Eng Ind Aero*, 1983, 13: 477—488[DOI]
- 13 Boggs D W, Peterka J A. Aerodynamic model tests of tall buildings. *J Eng Mech*, 1989, 115: 618—635
- 14 Mochida A, Murakami S, Shoji M, et al. Numerical simulation of flow field around Texas Tech Building by Large Eddy Simulation(LES). *First Int Symp On Comp Wind Eng*, Tokyo, Japan, 1992

- 15 Nicholls M E, Pielke R A, Eastman J L, et al. Application of the RAMS numerical model to dispersion over urban area. *Wind Climate in Cities*, 1995. 703—732
- 16 Kato S, Murakami S, Mochida A, et al. Velocity pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1992, (41-44): 2575—2586
- 17 Murakami S, Zeng J, Hayashi T. CFD analysis of wind environment around a human body. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1999, 83: 393—408[DOI]
- 18 Mochida A, Murakami S, Ojima T, et al. CFD analysis of mesoscale climate in the Greater Tokyo area. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1997, (67-68): 459—477
- 19 Kato S, Murakami S, Takahashi T, et al. Chained analysis of wind tunnel test and CFD on cross ventilation of large-scale market building. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1997, (67-68): 573—587
- 20 Shiraishi Y, Kato S, Murakami S, et al. Numerical analysis of thermal plume caused by large-scale fire in urban area. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1999, 81: 261—271[DOI]
- 21 张宁, 蒋维楣, 胡非. 利用  $k-\varepsilon$  湍流能量闭合方法对城市街渠内气流结构的模拟. *空气动力学学报*. 2001, 19(3): 296—301
- 22 张宁, 蒋维楣, 王晓云. 城市街区与建筑物对气流特征影响的数值模拟研究. *空气动力学学报*, 2002, 20(3): 339—342
- 23 张宁, 蒋维楣. 建筑物对大气污染物扩散影响的大涡模拟. *大气科学*, 2006, 30(2): 212—220
- 24 徐敏, 王卫国, 蒋维楣. 建筑物尾流区气流与污染物扩散的数值计算. *环境科学学报*, 1999, 19(1): 52—56
- 25 苗世光, 蒋维楣, 王晓云, 等. 城市小区气象与污染扩散数值模式建立的研究. *环境科学学报*, 2002, 22(4): 478—483
- 26 桑建国, 刘辉志, 王宝民, 等. 街谷环流和热力结构的数值模拟. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 69—81
- 27 Wang B M, Liu H Z, Chen K, et al. Evaluation of pedestrian winds around tall buildings by numerical approach. *Meteorol Atmos Phys*, 2004, 87(1-3): 133—142
- 28 王宝民, 刘辉志, 桑建国, 等. 北京商务中心风环境风洞实验研究. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 631—640
- 29 姜瑜君, 桑建国, 张伯寅. 高层建筑的风环境评估. *北大大学学报(自然科学版)*, 2005, 42(1): 69—76
- 30 刘辉志, 姜瑜君, 梁彬, 等. 城市高大建筑群周围风环境研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 I): 84—96
- 31 Jones A C, Launder D B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. London: Academic Press, 1972. 358