

摘 要

近年来,随着我国经济建设的发展,城市规模的不断扩展,高层建筑大量建设,与此同时高层建筑群风环境的问题的日益突出,引起了人们的普遍关注。由于高层建筑群的成员建筑物之间的互相干扰,使得建筑物周围风环境状况较之单个建筑物的情形要复杂的多。本论文研究了高层建筑周围产生的不良风环境问题,主要工作如下:

第一、二部分:对国外在有关风环境问题的研究情况进行了阐述。对高层建筑风环境牵涉的各个方面情况进行了分类和概括,这些研究方面包括:风舒适性准则制定、用于评价当地风环境的风气象资料的收集、风洞实验步骤的制定,数值模拟的方法、以及风环境的预估控制。而这些方面的研究对于制定适合我国国情的风环境预估控制规程也是必需具备的条件。

第三部分:应用标准 $k-\epsilon$ 模式模型,数值模拟了建筑群风场,得到了平均速度、湍流度的等值分布曲线,并与我们前面的实验进行了比较,取得了较好的结果。数值模拟采用 2×2 正交布置的不同截面形状的建筑群进行模拟,1)方形建筑物尺寸为 $180(H \text{ 高}) \times 45(W \text{ 宽}) \times 45(D \text{ 深}) \text{ m}$, 2)长方体形建筑物尺寸为 $180(H \text{ 高}) \times 90(W \text{ 长}) \times 45(D \text{ 宽}) \text{ m}$ 。建筑间距共取两种工况,分别为 1.5 倍、2.5 倍的建筑宽度。根据数值模拟结合相关的文献资料可以建立一些基于建筑物尺度与流场关系的经验模型,用于对一些实际的建筑布局形态进行风环境的初步预估。

第四部分:对浦东陆家嘴地区的部分高层建筑的风环境进行了实测及数值模拟,实地测量采用的仪器是手提式三杯风速仪,测量季节选为冬季。测量数据与数值模拟结果作了对比,发现数值模拟的结果与实测较为接近,同时根据模拟数据对当地风环境做了简略的评价。最后对高层建筑风环境的预防和补救措施进行了概括阐述,其中涉及到的一些概念和方法对于城市规划部门、建筑师及房产开发商将具有一定的参考价值。

关键词: 高层建筑物; 数值模拟; 风环境; 绕流

Abstract

More and more of high buildings have been built in our country with developing the economics and the city recently. A lot of wind environment problems are encountered. People focus on the problems about the flow field around the buildings. Because of the disturbance of the buildings nearby, the wind environment of the group buildings are more complicated than the single one's. This thesis focuses on the wind environment problems around the group high buildings.

Part I、II: It presents recent research findings of wind environment problems around high buildings. It attempts to classify and generalize relevant information of wind environment problems around high buildings in order to constitute the knowledge base of wind ordinance fitted in china, including acceptability criteria, weather data ,wind procedure, numerical simulation and etc.

Part III: The wind field of high building was computed numerically by $k-\varepsilon$ model. The distribution of mean wind speed and rms wind speed for all case as contour maps and current findings. A 1:1 scale model of a representative building blocks with different cross section was constructed, consisting of 2 by 2 grid of uniform building blocks :1) $180\text{m} \times 45\text{m} \times 45\text{m}$, 2) $180\text{m} \times 90\text{m} \times 45\text{m}$.with 1.5 and 2.5 multiples of 45m separation breath. and the wind direction to the front face of the test building blocks with 0 and 45 degree. Some generic models established with the empirical relations between wind conditions and building configurations can be applied for the preliminary estimation of wind environmental conditions in built-up regions.

Part IV: The application studies in this thesis are related to the result of full-scale measurements at the base of high-rise buildings located in a Shanghai CBD and the comparison with numerical simulation. The full-scale measurements are carried out using a mobile three-cup anemometer with a wind vane for the major wind direction in winter. Several limited comparisons of numerical simulation results and full-scale data are given. It is found that the numerical simulation method generally gives a reliable prediction of full-scale wind conditions near the high-rise buildings. Brief comfort assessment of the local wind conditions around the buildings was taken

by measurements of the velocity ratio, which compared with local wind speed for direction of interest. At the end of thesis generalize some mitigation and remedial methods and procedures which will do good to the city planning department, architecture and real estate developer.

Key words: high building(s), numerical simulation, wind environment, flow around/over

第一章 概述

§ 1-1 研究背景

随着人口的日益增多和建筑科学技术日新月异的进步,以及城市建设节约用地的需要,高层建筑和超高层建筑都得到了飞速的发展,从1885年美国芝加哥家庭保险公司——目前公认的第一幢有现代意义的高层建筑的建成到现在,高层建筑的发展已经走过了一百多个年头,而真正高层建筑的大量兴起还是近二、三十年间。一方面,随着钢铁、机械、电气及电梯工业技术的进步,在技术上为高层建筑的进一步发展提供了可能性。另一方面,伴随着城市用地的进一步紧张,发展商不断要求提高建筑容积率,造成目前城市中的建筑越来越高,密度越来越大,而由高层建筑引发的建筑风环境问题已引起广泛的注意。

人、自然、建筑、城市一直是紧密相关的概念,而风与它们都有关系,风是构成环境,尤其是室外环境的重要因素之一,在城市中,近地风的特性非常复杂,它不仅依赖于建筑物本身的外形、尺寸和某些建筑物特征(如开口、通道等),而且依赖于周围建筑物的相对位置、外形以及四周地形的粗糙程度。随着建筑物的增高、布局的密集,近地面大气层对建筑的影响也越来越明显。在近地面大气层内,空气的流动是很容易突变的,在某一点上的风向和风速,短时间内可能会有很大的变动,理论上认为是一种湍流现象。在高大建筑物周围变化更为剧烈,往往会引起局部地区风速的增大和紊乱,产生强烈的气流变化,引起风环境的恶化。

在一般的气象条件下,都市风影响着城市建筑环境的小气候。而高层和超高层建筑的问世,产生了尖锐突出的再生风环境和二次风环境,成为城市环境公害的一个重要方面,高层建筑周围强烈的湍流会对行人产生强烈的影响,直接影响到风环境的舒适感,在高层建筑林立的“山谷”之中,经常可以看到举步为艰,迎风前进的行人们。在美国纽约著名的华尔街金融中心区,由于地价昂贵,高层建筑紧密相邻,由此引发的大楼风终年不散,对周围的环境舒适性造成严重的影响。每当城市遇到恶劣的风气象条件,如台风,飓风时,这种风环境影响将转为带有破坏性的灾害。它会使建筑外墙的幕墙玻璃或窗扇受到破坏;瞬时改变风向或突然提高风速的大楼风,还将使人行动不稳,甚至酿成重大事故。其中,最引人注意的报道是1972年英国Portsmouth市有一位老太太在一座16层的大厦拐角处被风吹倒而死亡^[1];在1982年1月5日,在美国纽约曼哈顿岛世界贸易中心双塔附近的一幢54层超高层建筑前的广场上,37岁的女性罗丝·斯皮尔波盖尔正在行定时,被突然刮来的强风吹倒而受伤,为此她以“由于建筑设计和施工上

的缺点”而造成了“人力无法管理的风隧道”为由，向纽约最高法院对该建筑的设计人、施工者、建筑所有人、租借人，甚至包括相邻大厦的有关人员都提出了控告，并要求支付 650 万美元的赔偿费^[2]。诸如此类由于风环境出问题的例子很多，现在，高层建筑及其群体所引起的周围风环境问题，已成为高层建筑设计必须首先考虑的问题之一。

不良风环境的影响：

- 人

造成人们活动的障碍
有不舒适、寒冷的感觉
行走不稳、摔倒
手持物易脱手

- 建筑物

广告牌吹坏、玻璃破碎、门窗开关困难
屋顶掀翻
建筑的给排气、通风性能不好
强风造成的建筑尖锐噪音或挤轧声等噪音

- 自行车

车骑不快、费劲、不易控制

- 其他

植物倾倒、受伤害
晾晒在外的物品易被吹掉
商店等的陈列品翻倒、飞散
灰尘、垃圾飞散，影响环境
风大时气温下降，无风时闷热异常等对环境温度产生的影响

大量的事例，不断发生的纠纷、诉讼都在提醒着有关政府部门、规划师、建筑师和风工程学家：风环境和再生风环境已是不可回避的尖锐问题，必须从立法、规划、设计、实验、理论诸方面进行深入研究，从而提出必要的对策，而近些年来国内外对这一领域的研究也已开展起来。

近 20 年来，由于亚洲特别是环太平洋西岸地区经济飞跃和持续的发展，这一地区内很多城市普遍进行更新和改造，大量的高层、超高层建筑应运而生，然而，由于对室外风环境的预测不够重视和缺乏有效的技术手段，设计者们一般是把注意力过多的集中在了总平面的功能布置，美观设计及空间利用上，而很少考虑高层、高密度建筑群中空气气流流动情况对人以及污染物扩散等的影响，事实

上,良好的室外环境,不仅意味着在冬季盛行风风速太大时不会在建筑群内出现人们举步为艰的情况,还应该是在炎热夏季能利于室内自然通风的进行(即避免在过多的地方形成旋涡和死角),非典时期病毒的迅速蔓延,有很多就是由于通风不畅导致病毒的滞留引起的。但在国内,相应建筑风环境的研究和管理还未引起足够的重视。

就我国的“风环境”研究而言,可以说是刚刚处于起步阶段,一些重点工程的设计中也进行过风洞实验,但其主要的目的都是利用空气动力学的手段,对这些建筑或构造物所引起风载和风振问题进行研究,从而为结构上的抗风设计提供更为安全可靠的数据,当前许多高层建筑也不是由地震载荷而是由风载荷来决定结构骨架。至于从环境科学的角度,科学地预测和评价新建筑对于周围环境在风环境方面的影响,还没有见到过这方面的报导,肆虐的“非典”也给我们敲响了警钟,使我们看到,关注和改善建筑群风环境,杜绝和防止风环境污染,已经不仅是为了提高人们的生活质量的问题,而且直接关系到广大人民群众的身体健康和生命安全,所以我们必须从观念上不断的提高认识,从而找出正确的对策和解决的办法来。

伴随着国民经济的发展和人们环保意识和健康舒适理念的提高,住区环境质量越来越受到更多人的重视,对住区风环境进行优化设计,必将成为小区和城市规划的重要环节,为此,为了营造健康舒适的居住微环境,就需要在规划设计阶段对建筑进行风环境作出预测评价,以指导、优化建筑群的规划设计。

§ 1-2 建筑物周围风环境的空气动力学性质

1-2-1 自然风的性质与建筑物周围的风环境

在大气边界层中的自然风,由于受到处于风场中建筑钝体的阻挡,使得在建筑物的周围区域风场产生很大的变化。实际的建筑钝体本身具有各种复杂的三维几何体形状,而处于大气边界层中的自然风来流本身沿铅直高度有不同的风速,这些都造成了建筑物周边的气流在空间和时间上都具有非常复杂的非定常流性状。

建筑物的存在改变了其周围的气流分布,造成局部扰动,由此而引起速度场和压力场的变化,发生空气动力学畸变,建筑物对上游的气流具有阻挡作用,在下游形成下洗现象,使周围的流场变得非常复杂,尤其是随着城市建筑密度的增加,建筑物之间的气流影响也增大,建筑物与主导风的角度、建筑物之间的距离、排列方式等产生的各种风效应对建筑物和周围的环境影响很大,大多数建筑物的形状都是非流线形体,各个方向的气流流经建筑物时都将引起振动问题,也会形

成气流死区,易使附近某些空气污染物滞流,不利于周围的空气环境。特别在高密度住宅区由于人口密度大、环境相对封闭,疫病一旦进入,具有传染速度快、扩散危险高的特点,典型的例子象香港淘大花园的“非典”病毒通过下水管线和风道传播扩散 300 多人。为了实际研究的方便,这里采用了通常研究钝体空气动力学流动性质的理想假设,即忽略小尺度的非定常性,而用定常流的观点对流态进行定性分析。

建筑物周围的流场,在定常的观点下研究,往往可以分为四个不同性质的流域^[3]。

1) 自由流区

自然来流在遭遇建筑钝体的阻挡时产生偏向,并在建筑物前方、侧方形成了自由流区。它位于边界层外部的势流区,在理想的假设下,不考虑二次流所产生的紊乱,此流域可以用 **Bernoulli** 公式进行描述。

2) 分离剪切层区

一般情况下,有风速为零的边界层建筑物表面一直到建筑物外侧自由流域中间,有一个剪切层区,此剪切层是边界层从建筑物表面分离的时候,在分离后尾流(wake)与自由流区之间所形成的,对于二维圆柱和矩形建筑分离点却不是一样的,圆柱建筑周围气流流动,因无角点,其分离点不固定,在不同雷诺数 $R_e = \frac{UD}{\nu}$ (U —特征速度, D —特征长度, ν —运动粘度)、来流湍流度 $\sigma = \frac{\sqrt{u'^2}}{U}$ (U —平均速度, u' —脉动速度)和圆柱表面粗糙度下会有不同的流型。而一般绕矩形建筑的流动,分离点总是固定在前缘角点处,相对圆柱来说,流动特性对 R_e 数不敏感。但是在此流动中,尾流和自由流区间发生的剪切作用会产生强烈的紊乱。

3) 尾流区

处于整个分离剪切层以内的流动区域即是尾流区。它与到达建筑物后方的自由流相比流速较弱,并且具有明显的环流。

4) 滞止区

处于建筑物迎风表面前方的区域称为滞止区。在这个流域的中心形成了流的滞止点(stagnation point)。滞止点上部是向上的流,下部是向下的流,并且在迎风面前侧形成驻涡(standing vortex),高处高能量的气体被输运到下方,并随着分离流线向侧面、后面传送。

由于自然风,即大气边界层气流,具有很大的湍流度,另一方面,以钝体形式出现的建筑物具有各种形状的前缘,而来流湍流度和物体的形状对流体的分

离、剪切层的形状以及尾流特性都有重要的影响。上述建筑物周边流场的性质随着建筑物的具体形状、自然风向等性质的变化而发生改变, 流体从建筑物表面的分离和再附着现象是最有代表性的一种情况, 流体再附着现象随着流体入射方向与建筑物侧壁面的交角以及顺风方向建筑物边长有着密切的关系。一旦再附着现象在建筑钝体上产生, 分离流与建筑物壁面间将产生强烈的旋涡, 分离流线进一步向外侧推使分离点近旁自由流收敛加强, 风速加大。此外, 当入射风的湍流度增大, 边界层内湍流掺混加剧, 它将有助于使动量高的流体输运到建筑钝体表面, 从而使分离推后出现, 尾流域相应变窄。因此, 自然风来流的性质对建筑物流场有很大的影响。

1-2-2 建筑物周边区域流动与强风发生的关系

建筑物周边区域中强风发生的三种情况:

a. 由于分离而产生流束收敛的自由流区域

由于边界层分离而使自由流收敛, 风速会明显增大, 从理论上这种现象可用 Bernoulli 流管定理来解释。

假定无限远来流某流管面积为 A_s 、流速为 V_s , 至建筑物附近处面积 A 、流速 V 。则经过收敛的自由流速 V 的大小与无限远点来流平均风速 V_s 相比, 将随面积比(A_s/A)的增大而增大。

Bernoulli^[4]定理可由下述描述:

$$\frac{\rho V_s^2}{2} + P_{ss} = \frac{\rho V^2}{2} + P_s = \text{const}$$

其中 P_s , P_{ss} 分别是流管出口, 进口的静压(Kg/m^2), ρ 是空气密度($\text{Kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$)。

用这个关系式的话, 上述的风速比(V/V_s)可由下式表示:

$$V/V_s = \left\{ 1 - \frac{P_s - P_{ss}}{\frac{1}{2}\rho V_s^2} \right\}^{1/2} = \sqrt{1 - C_{pw}}$$

C_{pw} 是流线上的静压系数, 它在自由流线上可看成与建筑物的背压系数 C_{pb} 大致相等

$$C_{pb} = \frac{P_{sb} - P_{ss}}{\frac{1}{2}\rho V_s^2}, \text{ 其中 } P_{sb} \text{ 是作用于建筑背风面的静压}(\text{Kg/m}^2)$$

所以自由流线上的风速可用下式概略表示

$$V/V_s = \sqrt{1 - C_{pb}}$$

但在实际问题中,自由流线上的流速不是一定的,到了后面,流体所具有的能量会发生散逸,流速也将随之衰减。

b.建筑物开口部位通过的气流

穿堂风造成的风速增大,在空气动力学上认为是由于建筑物迎风面与背风面的压力差所引起的。

c.建筑物迎风面下降的气流

由于下降流而造成的风速增大,高处高能量的空气受到高层建筑阻挡,从上到下在迎风面处形成了迎风面前部垂直方向的旋涡,也造成了此处的风速加大。特别是与高层建筑迎风方向相邻接的低层建筑物与来流风呈正交的时候,在低层建筑物与高层建筑之间的旋涡会更加剧烈运动。

§ 1-3 既往的研究

风环境问题早在古罗马时期就已经受到注意了。当时的建筑巨匠维特鲁威在他的建筑学经典著作《建筑十书》中就已经提到过。他当时还向执政官提出了有关如何改善该问题的办法,他建议,在建筑规划中,城市街道的布局方向应与当地冬季的主导风呈正交布置,由于风不能沿着街道空旷处行进,因此可为行人提供最大限度的风遮蔽。

现代的风环境问题是由于高层建筑的大量兴建引起的。在国外,此问题始于60年代。当时随着钢铁、机械、电气及电梯工业技术的发展以及成熟,法令允许建筑突破防火限高45米的法律制约后,兴建高层建筑成为热潮。然而,随着一幢幢高层建筑的竣工完成,种种预先没有估计到的高层建筑负面效应也同时产生,随着一系列风害事故的发生,风环境问题作为一项主要的社会问题引起了重视。

1965年,在伦敦召开了以“建筑构造物及其产生的风效应”为题的国际会议,W.D.Baines^[5]在会上提出“自然风中的高层建筑会把高处能量高的气流引导到下方,使周边的低层建筑受到很强的气流影响,同时地面上的风速也随之增大。”这个结论是Baines通过风洞实验和实地考察后得出的。此后,运用风洞实验对高层建筑物周边气流现象进行研究的工作开始发展起来。

K.C.White1968年在考察高层建筑物周围步行者所要求的舒适性条件后,对

在复杂的低层街区内改造 18 层高层建筑所引起的周边风环境问题进行了实地调查.日本的相马、荒川^[6]等也作了相关的实测研究。他们指出了“在建筑周边地面上将出现与高层建筑楼顶相当的风速。”这在风环境问题研究中较早的引入了风速比的概念。

此后,随着研究的进展,对强风发生的情况预测、评价及可能的改善对策等都有了进一步的结果、A.F.E 文献^[7]对高层建筑迎风面前的驻涡进行了研究,发现高层建筑前方有低层建筑物存在时,旋涡运动将明显加强。通过风洞实验,对高层建筑的高 H , 宽 W , 迎风面前方的低层建筑物的高 h 及二者相互距离 L 等参数变化进行了进一步考察,最后引进了地上高度 a 处的风速 U_a 与高层建筑屋顶相当风速 $U(H)$ 之风速比 $R(H) = U_a / U(H)$ 作为变量,提出了实验推算式为: $R(H) = U_a / U(H) = 0.24 \{ (a/H)^{0.28} + (L/H)^{0.4} (W/H)^{0.4} (H/h)^{0.8} \}$ 用于描述该风环境现象。

W.H.Melbourne^[8]也作了类似的风洞实验,有关的结果可参考具体的报告.同时, W.H.Melbourne 还对穿堂风问题进行了针对性研究.他以高层建筑物宽度 75m、深 30m、穿堂风口面积高 7.5m×宽 15m 为不变量,高度 H 在 15m—225m 之间变化进行 1/600 缩尺模型的风洞实验。发现穿堂风速随建筑物增高而增大,最高可达高层建筑楼顶风速的 94%。

另外, A.F.Ewise 和 A.D.Penwarden^[9]对由于高层建筑物角区附近分离流的下降而造成的风速增强现象进行了研究。研究以相当建筑物高度 H 做为范围半径。在这范围中,地面上最大的风速相当于建筑楼顶风速的 91%,或相当于地面高度无建筑影响风速的 1.96 ± 0.06 倍,同样课题的研究也同时在好几个国家进行着。

近年来,计算流体力学和计算模型的最新发展为研究高层建筑物周围风环境提供了新的方法和手段,早在 70 年代初,人们就试图对通过非流线型建筑的绕流进行计算^[10],但由于当时计算机水平的限制,直到 70 年代末期才开始有了一定的发展^[11],各国学者通过计算机数值模拟对建筑物周围风环境进行了一系列的仿真分析并与风洞实验的结果进行了对比,结果表明,数值计算能够较好的预测建筑物周围气流流动状况^{[12][13][14]},但对建筑群风环境的数值模拟的具体研究很少有见报导。

日本的 Murakami^[15]最早用大旋涡方法^[16]来进行数值估算建筑物周围的三维空气流场,他将计算结果与实验结果进行了比较,并对模型进行了分析和改进。

Vasilic-Melling 最早用 $k-\varepsilon$ 模型将三维建筑物周围流场的计算作为其模拟二维流体经过篱笆情况的延伸。Hanson^[17]研究了流体绕过建筑物的情况,虽然他并没有对湍流进行处理。其结果已由 Sumne^[18]运用 Lawson 在边界层风洞中所得数据进行了验证。Pateerson^[19]做了类似的研究,他对 $k-\varepsilon$ 模型进行了修改,计算了建筑物周围流体的速度场和压力场,并将计算结果与风洞实验进行了比较,对两者之间的差异进行了分析,提出了改进意见,他的工作对准确计算建筑物周围流场具有非好的指导和借鉴作用。

近年来, Stathopoulos^[20]等人对 $k-\varepsilon$ 模型进行了修改,对计算矩形建筑物周围流体速度场和压力场也作了有益的尝试,在提高模拟精确度方面取得了进展。Rodi^[21]等人则对 $k-\varepsilon$ 模型提出了修改,特别是对耗散方程进行了修正,取得了较好的模拟结果。

在 1970 年至 1972 年的研究阶段,风环境课题主要的研究对象还是在驻涡与穿堂风等特定条件的气流现象中开展着,对于角区的分离流,仍只停留在概略把握上,直到 1972 年,在英国发生了一起在高层建筑物周边步行的老年妇女因强风刮倒,颅骨摔裂而数日后死亡的事故。此后,以英国 B.R.E(Building Research Establishment)为中心,以研究建筑物周围气流问题的工作开始开展起来。

1-3-1 风环境研究视点

建筑风环境问题从概念上来讲由三个主体组成,即风—人—建筑钝体。这三者之间相互作用构成不同方面的几对矛盾,使得要研究建筑风环境需要从以下几个方面入手:

(1) 风与人之间的关系,它属于风环境心理学领域,表现为各种风环境状况对人的行为及进一步在心理上产生的影响。

典型的研究问题有:

- a. 风环境中的哪些指标会影响人对环境的舒适感(风速、湍流度等其他物理因素)。
- b. 各种指标的大小与人的不舒适反应程度的关系。
- c. 各种指标的重要程度次序和适用范围。

(2) 人与建筑的关系。这是一个非常古老的领域,已经发展成目前非常成熟的建筑学。在风环境研究中它主要体现在:如何使得被建筑功能定义的人群活动空间避开恶劣的建筑风环境空间,同时又不影响建筑物使用功能的本身;甚至通过合理的措施根本消除当地风环境可能产生的问题。

典型的研究问题有:

- a. 有哪些措施可以满足人们建筑功能的使用要求, 同时改善风环境状况。
- b. 建筑物周围哪些区域是人流频繁使用的及如何保证或改善这些区域的风环境条件。

(3) 风与建筑钝体之间的关系。主要研究各种形状, 各种布置方式的建筑钝体和钝体群在不同风向情况下所产生的风环境流场状况, 特别研究哪些情况会造成恶劣风环境, 以及这些恶劣风环境区域的具体发生位置。

典型的研究问题有:

- a. 不同截面形状的建筑物对风环境的影响。
- b. 恶劣风环境区域位置与建筑物尺度的关系。
- c. 建筑群体布置方式对风环境的影响。

1-3-2 舒适性准则研究

为了定量的定义环境舒适或不舒适的概念, 要求:

- 1) 建立各种行人区不舒适度与造成不舒适度的风速之间的关系
- 2) 对这些风速, 规定最大可接受风的发生频度

a. 风速与行人区的不舒适

记 U 为离地约 2m 高度处 10 分钟至 1 小时的平均风速, 通过观察对人的作用及人在顶风活动时的忍受程度, 可得出下列不同风速 U 引起的不舒适度^[22]。

$U=5\text{m/s}$	开始感到不舒适
$U=10\text{m/s}$	明显地感到不愉快
$U=20\text{m/s}$	危险

各种强度风(按经典的 Beaufort 蒲福风力级定义)的作用, 比较详尽的描述于下表中。Lawson T.V. and Penwarden A.D. 在“The Effects of Wind on People in the Vicinity of Buildings”^[23]给出了在各种日照、环境温度、衣着以及风速条件下, 行人步行舒适性的初步资料。

文献^{[24][25]}所报道的实验认为: 行人舒适性不仅是平均风速 U 的函数, 也是风的阵发性的函数。因此, 原理上可用有效风速 U_e 研究风对人的影响, 该有效风速的定义为:

$$U_e = U \left[1 + k \frac{(\bar{v}'^2)^{1/2}}{U} \right]$$

式中：U 是平均风速， $(\bar{v}'^2)^{1/2}$ 是纵向脉动风速的均方根，k 是反映脉动作用剧烈程度的常数。根据文献^{[24][25]}的结果，这一常数的适当值为 $k \approx 3.0$ 。

风效应一览表

蒲福风级	风的描述	风速(m/s)	风效应的描述
0	静风	小于 0.4	感觉不到风
1	软风	0.4—1.5	感觉不到风
2	轻风	1.6—3.3	脸部感觉有风
3	微风	3.4—5.4	风展旗帜，吹动头发，飘动衣服
4	和风	5.5—7.9	风扬起灰尘、干土和纸片，吹乱头发
5	清劲风	8.0—10.7	身体感觉到风力，雪被吹向空中，是地面上适宜风的限度
6	强风	13.9—17.1	撑伞困难，头发吹直，难以平稳行走，风声听起来不舒服，形成雪暴
7	疾风	13.9—17.1	行走时有不方便感
8	大风	17.2—20.7	通常进行受阻，在阵风下保持平衡非常困难
9	烈风	20.8—24.4	阵风将人吹倒

但也有人采用 $k=1.5$ ^[26]或 $k=10$ ^[27]。按照文献^[25]，由风洞实验与对行人举止的观察，可提出下列风速 U_e (对应于 $k \approx 3.0$) 与各种不舒适度之间的关系：

$U_e=6\text{m/s}$	开始感到不舒适
$U_e=9\text{m/s}$	影响动作
$U_e=15\text{m/s}$	影响步履的控制
$U_e=20\text{m/s}$	危险

日本在一座大型风洞里以及在一幢高耸建筑底层，对 2000 多行人的步行动作进行了连续观察，导出下列建议准则：

$U_3 < 5\text{m/s}$	行动不受影响
$5\text{m/s} < U_3 < 15\text{m/s}$	行动受影响
$10\text{m/s} < U_3 < 15\text{m/s}$	行动受到严重影响
$15\text{m/s} < U_3 < 20\text{m/s}$	行动受到及其严重影响
$U_3 > 20\text{m/s}$	危险

式中 U_3 为 3 秒内平均风速^[28]。如文献所指出，这一准则等同于文献^[26]中的准则

或略微严格一些。

如果行人突然暴露在强风中,例如气流的空间分布非常不均匀的区域,那么行人对这种强风的适应能力将受到不利的影响。文献^[25]中指出,如果在小于2m的距离内,平均风速变化达70%,则风对人们的作用将比以上所建议的更严重。

b. 舒适性准则制定

舒适性准则的制定可以归结为以下两个问题的解答:1. 导致行人产生不适感和不安全的极限风速是多少 2. 当这种极限风速发生的频度超过多少时,该风环境被认为是不合格的。

文献^[1]建议以下的简单准则(基于对建筑环境中近地风效应研究的大量数据):如果在行人区,估计平均风速 $U < 5\text{m/s}$,出现频度小于10%,则行人对风的条件不会有什么抱怨。如果估计频度在10%到20%之间,抱怨就可能增多。如果估计频度大于20%,必须采取某些补救措施减小风速。

随着大量准则的推出,对各准则适用性的比较、界定是非常必要的。文献对较为流行的五大准则即 Penwarden 和 Wise(1975)准则^[1]、Isyumov 和 Davenport(1975)准则^[28]、Lawson 和 Penwarden(1975)准则^[25]、Hunt, Poulten 和 Mumford(1976)准则^[27]和 Melbourne(1978)准则^[29]进行了大量的实验比较研究,并且听取了建筑师和工程师的意见后,对上述准则的局限性进行了评价。指出在具体进行评价时,同时考虑几种准则,并且根据建筑项目的实际情况带上工程师自己对各准则局限性的判断和经验,比单纯采用某一准则更可取的方法。

综合众多文献,要全面评价一个地域的风舒适性,除了考虑风力因素外,还应包含其他与人的环境反应相关的物理因素。行人区舒适度应是好几个因素综合的结果:风力、热舒适度、风致颤栗、噪声情况、空气质量、街道空旷度、审美度等等。其中风力、热舒适度及风致颤栗是最主要的决定因素。

- 风力:包括风发生频率、风速、风向、湍流度、不同的风力会产生不同的风效应,如阻碍行走、刮走文件,使伞变形、一种极端的情况是把人刮倒。

- 热舒适:包括相对温度、太阳辐射能力、气温、行人活动剧烈程度、风速和衣服导热程度。这些因素都决定人们对环境感觉是冷、热或者是中性。

- 风致颤栗:包括风速、温度的影响,它主要根据风速和空气温度共同作用于暴露皮肤的感觉来决定的。虽然在衣服保温下通常会感到热舒适的满意,但暴露的皮肤如脸、手都会在恶劣的风条件下感到极难忍受。

1-3-3 钝体空气动力学研究

钝体空气动力学在建筑方面的研究是风工程及工业空气动力学最早研究的内容。通过近三十年来实验和理论的研究,对于在理想状态下(即稳定的风洞环境中)钝体建筑单体及群体的风环境现象已有了一定的了解,取得了一些实验结果和经验公式。随着该领域研究的不断深入,对风环境现象的揭示及客观定量的描述将越趋准确,并为城市规划和建筑师解决风环境不良影响提供理论上的参考依据。

a. 单体建筑:

对于单体建筑的研究,诸多实验的结果可以说明对于常用的四边形平面建筑,建筑师们所关心的最强风往往出现在以下几个区域:

1. 建筑迎风面前部区域
2. 建筑角区外侧区域
3. 建筑底层发生贯通的穿堂风区域

文献^[30]在对前人的有关实验结果做了大量的统计工作,并结合自己的实验对上述三种情况给出了具有一定参考价值的经验公式。它引进了 K 速比系数作为评价建筑对风环境的影响程度:

$$K = U_{local} / U_{ref}$$

U_{local} 是建筑建成后的某点平均风速, U_{ref} 是没有建筑时的平均风速。同时它引用了 Wilson 对大楼风影响区域尺度 S 的定义,

$$S = (B_l B_s^2)^{1/3}$$

其中 B_l 是建筑迎风面长边长度, B_s 是短边长度。

● 迎风面前部区域

在建筑前部的涡流是沿着地表面泛起的来流和由于压差从高处降下的气流混合形成的。根据大量的实验结果,最大风速往往出现位于建筑前部 $0.35S$ 处的马蹄形涡中心区域。

b. 双建筑模式

● 串列布置

当两建筑物沿风向成串列布置,特别是前面的建筑较低时,位于高建筑前方的旋涡流会因前方建筑的高度和两建筑间的距离 L 而发生变化^[31],在低层部将产

生很大的逆流,在迎风面的建筑下面如设有架空柱,狭窄的开口时,同样会产生更大的风速。在低层或多层建筑群中建突出的高层建筑时情况将更加复杂。

● 并列布置

当两建筑并列布置,来流风能顺着两建筑间隙贯通时,往往出现较为严重的强风。强弱程度与两建筑的间距 L 和建筑的 S 有关。文献^[30]引进了 $K_{\text{gap}}/K_{\text{corner}}$ 来揭示这种情况下的风环境与单体建筑角区风环境之间的差别,最大的风往往出现在 $L/S=0.4$ 处,两种极端的情况是 $L/S \leq 0.1$ 和 $L/S \geq 1.0$,当 $L/S \leq 0.1$ 时来流将会因间距太窄受阻,大部分流向建筑外侧角而未产生峡谷效应;当 $L/S \geq 1.0$ 时,由于间距较宽,对穿堂气流的增速效应减弱。

c. 群体建筑

群体建筑的风环境状况要比前面两种情况复杂的多,在实际研究中它往往作为一个街区问题被考虑。

文献^[32]的实验结果表明,对于均匀布置的等高建筑街区可以根据建筑迎风面几何尺寸和街区尺度来定义一个阻塞系数 $R_B = \frac{A_s}{A_F} = \frac{Wh}{(W + L_a)^2}$,其中 W 为建筑迎风面宽度, h 为街谷高度, L_a 为一半的街谷宽度。根据大量的实验研究,沿着街道风向的平均风速可以由这样定义的阻塞率得出。

即 $\overline{U_s}/U_0 = 1 - 0.9R_B^{0.4}$, 其中 $\overline{U_s}$ 为有等高建筑街区的平均风速, U_0 为没有建筑时的风速。

而当某一建筑高于周围街区建筑时,街区最大风速分布是一个与建筑相关高度差,测点高度和街区阻塞率有关的函数,根据大量实验得出的经验公式如下

$$(U_M/U_0)^2 = C_1(\overline{U_s}/U_0)^2 + C_2\left(\frac{H-h}{b}\right)^{C_3}$$

其中 U_M 是最大风速值, b 是测点高度, C_1 、 C_2 、 C_3 为相关常数分别为 2.0、0.12 和 0.88。

§ 1-4 建筑物风环境的预估和控制

风环境控制规划的制定需要各个相关学科的共同努力,它牵涉到风气象学、建筑学、环境心理学、风工程学、钝体空气动力学、城市规划和投资发展商的经

济利益等一系列因素。根据国外有关风环境规程制定的经验,这项工作往往有一个不断反复成熟的过程。

1. 当地风气象资料的收集

当地风气象数据的收集往往对当地城市风环境的评价有着密切的关系,每一地方都有自己特定的气象背景,因而应该有适合自己地域的一套风环境舒适评价准则。风气象数据在风工程问题中往往涉及以下几个因素。

● 当地大气边界层特征

包括城市、郊区、当地气象站所在地区的大气边界层风速廓线、湍流度分布。

风气象资料的样本选取时间将取决于当地的生活习惯时间,比如旧金山的样本取样时间为 7:00AM—6:00PM^[33]。旧金山的国家气象中心(NCC)对 1945—1951 年当地风气象数据进行了整理,并按小时统计输入计算机编成程序,以此作为当地风环境预估的风气象背景资料。

此外在风气象数据处理过程中还应该注意以下几点:

- 以什么时间单位进行风气象统计将影响到以后制定的舒适性准则评价。
- 测点位置通常是取当地市郊气象站离地 10m 高度的统计数据,以使风气象数据不受人为建筑等因素的气流干扰,保证具有地域代表性。
- 数据的地域统一性,它要求一个地区应专门确定一个用于当地风环境预估的风气象资料。

1. 舒适性准则的建立

为了正确评价建筑风环境的质量,需要制定风舒适性准则,它往往是建筑风规范中重要的组成部分。各个地区应该根据当地的风气象资料和生活习惯制定适宜的风环境舒适性准则,以对建筑项目作出合理的风环境预估。舒适性准则包括风速大小和频度。

旧金山选用舒适性和安全性两个准则构成整个评价体系^[33]。

- | | | | |
|-----------|---------------|----|----------------------------------|
| ● 休憩区风速限值 | 3.1m/s | 频率 | 不超过全年时间 10% |
| 样本时段 | 7:00AM—6:00PM | | |
| ● 步行区风速限值 | 5m/s | 频率 | 不超过全年时间 10% |
| 样本时段 | 7:00AM—6:00PM | | |
| ● 安全性风速限值 | 12m/s | 频率 | 只允许在一年中出现一次或者 1/8760, 样本时段 24 小时 |

此外还应注意风舒适性准则的制定应根据当地的风气象资料的取样时间单位有所调整。不同的取样单位会影响到最大平均风速的出现率。Lawson^[34]作了这方面的深入研究。研究揭示对于给定的风速限值,用最大3秒阵风做风气象的准则转成以分钟为统计单位时要乘以0.8系数进行修正,当用于以每小时的统计单位时要乘以0.6的系数进行修正。

关于风环境的预估和评价的具体方法在第二章风环境研究方法综述里具体介绍。

§ 1-5 研究内容

1-5-1 研究方向概述

有关高层建筑风环境的问题,各国学者进行了长期的研究,并取得了一些令人满意的结果。然而,由于问题本身力学行为的复杂性和学科交叉性,使得要真正全面掌握问题的机理性质并加以控制改善,还需进一步的研究。

目前该领域的研究工作可大致分为以下几个方面:

1. 基础研究领域
 - a. 风舒适性评价准则研究
 - b. 理想钝体模型的风洞实验研究
 - c. 建筑风环境相关的实验方法研究
 - d. 建筑风环境相关的数值计算研究
2. 应用研究领域
 - a. 实际高层建筑的风环境预估及评价
 - b. 恶劣风环境改善措施研究
 - c. 风环境法规的制定

1-5-2 本论文的工作

1. 基础研究

先前的研究对单体以及双体建筑周围风环境状况的空气动力学机理研究已经有了不少的风洞实验结果^[30]。有的还已经将数据进行了处理,提出了一些适用的经验公式,用以预估风环境的影响。在此单体基础上,对于建筑群体风环境的研究已成为下一步该领域工作的重点,这主要是出于以下的原因:

- 在建筑和城市规划上,城区开发往往成片进行,高层建筑群体的风环境研究对于建筑设计和城市规都有着实际的应用价值。

- 在钝体空气动力学上, 建筑的风效应并不是单体风效应的简单叠加。建筑群体间的互相影响, 使得风环境状况更趋复杂, 这方面的影响亟待进一步的研究。

出于以上考虑, 本论文在我们风洞实验^[35]的基础上, 对群体布置方式“2×2”不同横截面布置式样进行数值模拟研究。2×2 布置是构成更复杂群体的基本单元, 文献^[36]指出, 最前端的 2 栋建筑往往是影响风环境问题的关键。由此, 对 2×2 模式首先进行研究是必要的; 目前国内外对于 2×2 布置的研究结果比较少, 这方面实验及数值模拟结果的充实和分析无疑有利于该问题研究的进一步推动。

在构成群体的单元形状选择上, 本论文选用了方形, 长方体平面, 因为在所有的高层、超高层建筑中, 这些平面的建筑是最为普遍的形状。

2. 应用研究领域

在国内, 目前对于高层建筑会引发的风环境问题还缺乏全面的认识, 与国外的实际应用水平还存在着一定的差距。然而, 国内的高层建筑兴建量与日俱增, 由此而产生的风环境问题已不可轻视。本论文在参考国外大量风环境研究资料的基础上, 总结出一套高层建筑风环境的预估及评价办法, 利用数值模拟和实际测量相结合的方法, 分析了陆家嘴某楼群的风环境状况。

第二章 风环境研究方法简介

目前研究建筑物风环境的主要是通过现场观测、风洞实验及数值模拟的方法。

§ 2-1 现场观测法

这种方法可以正确地收集第一手资料,充分把握现状,简单易行。但如果要在较大范围内进行观测,或要积累长期观测的资料都有一定的困难。

§ 2-2 风洞实验

风洞实验是可靠性比较高的建筑物风环境预测方法。风洞是能人工产生和控制气流以模拟飞行器或周围流体的流动,并可度量气流对物体的作用以及绕流流场的一种管道状实验设备。研究风环境的风洞一般是边界层风洞,它首先能再现接近地面的边界层,然后将需要测定的建筑物和周围环境模型化,使气体流过模型。模型比例大小取决于建筑物阻塞面积和风洞断面面积的比例关系,近年来,一些研究者通过风洞实验,了解了建筑物周围风环境的一些基本规律,如单栋建筑物迎风面和背风面的气流规律、具有规则外形的建筑遵循一定规律的平面布置情况下的气流流动情况等^{[37][38][39]}。这种实验方法具有流动条件容易控制,可基本上不受外界环境影响,测量方法精确,可重复取得实验数据等优点。

2-1-1 相似理论

用几何缩尺模型进行模拟,显然是因为它经济而方便。但如何缩尺则引出了一系列物理相似性的问题。

所谓两个物理现象相似是指在对应点上对应瞬时所有表征现象的相应物理量都保持各自固定的比例关系(如果是向量还包括方向相同)。风洞实验是建立在绕模型的流场与绕实物的流场相似的基础上的,要求两个流场的对应点上对应瞬时所有表征流动状况的响应物理量都保持各自的固定的比例关系。一般情况下,只有保持几何相似、运动相似、动力相似及热力相似才可保证两个流场完全相似。

由相似定律知,在进行气动力实验时,首先要保证模型和实物的两个流场相似,实验中应测量各相似准则中包含的物理量,实验数据按相似准则进行整理,这样就可以把模型实验数据用到实物流场中去。

● 几何相似

模型和实物的几何相似的条件是:它们对应的各线段的比例相等,且对应的

角相等。如果以 L_p 代表原型的特征长度，以 L_m 代表模型的特征长度，以 α_L 代表原型长度和模型长度之比值，简称模型比尺，即：

$$\alpha_L = \frac{L_p}{L_m}$$

所以，面积比尺和体积比尺分别为：

$$\alpha_A = \frac{A_p}{A_m} = \alpha_L^2$$

$$\alpha_W = \frac{W_p}{W_m} = \alpha_L^3$$

一般情况下，模型越大越能反映原型的流动情况，但是，往往由于实验条件的限制，模型又不能做得太大。因此，实验时应尽量采用小模型比尺。从理论上说，应做到所有模型尺寸都按一个比尺缩小或放大，这种长、宽、高比尺均一致的模型称为正态模型。通常在气动力学模型实验中遇到是正态模型。实验的模型比例尺一般为 $1/200$ — $1/1000$ 左右，其大小主要取决于建筑物阻塞面积和风洞剖面面积的比例关系。国外研究表明：建筑物模型在整个风洞剖面中控制在 1 — 2% 左右最为理想，最大不要超过 3% 。

模型与原型表面粗糙度的相似，也是属于几何相似的范畴。严格的说，要实现这种相似是非常困难的。因此，一般情况下是不考虑粗糙度相似的。只有在流体阻力实验、附面层实验等情况下才考虑粗糙度的相似。

● 运动相似

运动相似是指两个流动现象的运动状态和运动轨迹呈几何相似；或者说，原型流动与模型流动中的对应点的速度向量是互相平行的，而且大小互呈比例，即速度比尺为：

$$\alpha_v = \frac{V_p}{V_m}$$

两个流动现象达成运动相似时，它们之间相应质点的运动轨迹也达成几何相似，并且通过相应线段的时间也成固定的比例。即时间比尺为：

$$\alpha_t = \frac{t_p}{t_m}$$

于是得到速度比尺与模型比尺、时间比尺的关系式：

$$\alpha_v = \frac{a_l}{a_t}$$

研究风环境的风洞实验中的运动相似，是要求模型的实验风速剖面应与大气边界层风速廓线相似。它们通常采用幂指数分布规律表示，即：

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{Z_0} \right)^\alpha$$

式中：

z —测量点高程， Z_0 —特征高度

u —相应 z 处的风速， U_0 —来流速度

● 动力相似

它要求模型流场的各点上流体微团所受的力与原型流场中的各对应点所受的力(例如惯性力、粘性力、重力、弹性力等)具有相同的比例。在实验条件下，模型和原型的无量纲参量： Re 数、 Fr 数、 Ma 数等应相等。要求所有无量纲参量都相等的条件称作完全相似，事实上由于流体实验的模型通常仅为原形的 $1/10$ — $1/10000$ ，要同时保证所有无量纲参量都相等几乎是不可能的。然而，对于具体的课题或流场中某个区域来说，往往只有一种或几种参量起主要作用。只考虑一种或几种参数的模拟，称作局部相似。在钝体空气动力学风环境研究中，一般考虑阻力相似和湍流特性相似。

关于阻力相似，在空气动力学实验中首先要求模型和原型环境的 $Reynolds$ 数相等， $Reynold$ (雷诺或 Re)数相等的原则要求风洞的试验风速按模型缩比的倍数增大，当风洞试验采用实际大气风速时，风洞中的 Re 数要比实际大气流动的 Re 数要小，要满足此条件需要很大断面的风洞或提高试验风速，但是以往的模型试验研究已表明，在很多情况下只要 Re 大于某临界值，流动特征与 Re 数无关，对于凸角长方体，临界雷诺数 $Re = \frac{U_0 Z_0}{\nu} > 10^{4[40]}$ 时，流动已进入湍流充分

发展阶段，流动特征与 Re 无关。实际建筑物周围大气流动的 Re 都很大，因此当模型 Re 数大于临界雷诺数时，模型与原型的相应点的流动状态相近。

关于湍流特性相似问题亦应考虑，因为无论是整体风环境还是局部风环境都与风场的湍流特性有很大关系。流动的湍流特性相似，则要求模型与原型的湍流

能谱相似,这当然是难以做到的,一般在研究中,往往要求模型与原型的湍流度分布相似。

● 热相似

热力相似条件通常用 **Richardson** 数表示, **Ri** 数主要表征模拟边界层与真实大气边界层的热力相似关系,根据以往的实际观察数据表明,在城市上空约 500m 以下的大气边界层中研究建筑钝体的风场特性时,热力因素可以忽略。

2-1-2 大气边界层的模拟

一般而言,风受到地面上各种粗糙元(草、庄稼、森林、房屋建筑等等)产生的摩阻作用而使风的能量减少因而风速减小,减小的程度随离地面的高度的增加而降低,形成上大下小的风速剖面,这一层受地球表面摩擦阻力影响的大气层称为大气边界层,城市建筑均处于大气边界层中,因此进行建筑风环境模拟研究必须模拟真实的大气边界层。不同的地面条件产生的大气边界层具有不同的特征。大气边界层特征主要包括平均风速剖面、湍流结构和温度层结等几个方面,在实际的建筑风环境风洞研究时,往往视研究的目的的不同,采取不同的模拟策略。一般只需要根据所在地的地貌类型依照建筑风规范来选择合适的风速廓线指数。

国际上人工形成中性大气边界层的模拟方法主要分为被动方法和主动方法两类^[41]。前者的原理是在风洞中用一定的装置对气流截面沿高度产生不同程度的堵塞,引起速度剪切层,将气流中少部分的动能转换为湍流的脉动能量。此类方法可模拟大气边界层的风速剖面和湍流度剖面,并且较为经济简便,目前为大多数风工程学者广泛采用。后者原理是对风洞中的主气流可控制的主动扰动方法,为湍流提供额外的能量,此类方法可以模拟风速剖面 and 湍流结构,有的甚至还可以模拟湍流场尺度。

2-1-3 测点选择

测点高度往往以实际行人区 2m 高度按比例缩小而得,测点位置往往由风工程师根据钝体绕流的机理来选择较易出现恶劣风环境的点,并且要综合考虑不同主导风向可能出现的测点区域。此外在模拟区另需选择一个不易受楼群干扰的点做为参考风速点,该点有的是选最高建筑的顶部,有的是选模型区中的开旷地。

2-1-4 数据采集(通常分成 8-16 个风向)

与人舒适度、安全性有关的流动参数有:平均风速、湍流脉动、风向。与此对应,在风洞实验中,不同地点的平均风速值是最基本的测试数据,这些风的特性参数将随时间和空间有不同程度的变化,因此测量需要考虑长程时间和整个易发

生问题的区域。

行人区高度就整个大气边界层尺度而言是很低的，这个层的平均风速很小，而相对湍流度和剪切应力较大。根据人体敏感度分析，往往是低频湍流(2—3秒阵风)对行人的舒适度和安全性有重要作用。因此合适的实验仪器必须满足上述要求，同时又考虑通常实验要求的低费用、高精度、敏感性和稳定性等因素。

对风环境的测量技术通常分为定量、定性分析，点测量和面测量技术。典型的点测量仪器有：热线测速仪和 PIV 技术、压力传感器、毕托管、激光测速仪等；面测量仪器通常采用风蚀技术、流动显示等。

2-1-5 数据分析、实验记录^[42]

记录中应包括：

模拟大气边界层特征参数，包括幂指数、边界层高度、湍流度随高度的分布，功率谱。

实验模拟区域的地图和照片。

标准的测点位置，误差在 0.5 米范围内。

所测得到平均速度、湍流度和峰值速度的表格。

所使用的评价指标速度，如等效风速等。

注意事项：

选取若干个参考点进行实验做结果对比。

规范的风环境预估办法。

2-1-6 预估和评价

通过风洞实验可以知道不同来流风条件下建筑物的风环境状况，结合当地风气象数据，就可对建筑风环境进行预估，这样就可知道“对应某个区域，大于某个风速极限的风发生的频度是多少”，再根据此比较当地的风舒适性准则，而对风环境作出评价。

§ 2-3 数值模拟

计算机数值模拟是在计算机上对建筑物周围风流动所遵循的动力学方程进行数值求解(通常称为计算流体力学 CFD)，从而仿真实际的风环境；由于近年来计算机运算速度和存储能力的大大提高，对建筑风环境这样的大型、复杂问题可以在较短时间(20—50 天)内完成数值模拟，并且可借助计算机图形学技术将模拟结果形象地表示出来，使得模拟结果直观，易于理解。同时，由于计算机模拟不受

实际条件的限制。因此不论实际建筑群布局形式如何、建筑物形状是否规则等,都可以对其周围风环境进行模拟、获得详尽的信息。利用计算机数值模拟方法还可以方便地仿真不同自然条件下的风环境,只需在计算机程序中改变相应的边界条件即可,如对于上海地区,若要对某小区的风环境进行预测,往往要考虑北风、西北风、南风等主导风向下的情况,用计算机数值模拟方法只需分别定义不同来流风向和风速就可以方便地对不同条件下室外的风环境进行仿真研究;当然,数值模拟方法最大的缺陷在于其可靠性,即仿真结果的可信程度。这需要率定和验证,即对同类流动采用合适的数学物理模型进行模拟、并和实验对比确定其可靠性、然后将经过验证的程序用于类似的建筑群气流流动模拟,从而保证模拟结果的相对可靠性。近年来,各国学者不断利用计算机数值模拟,对建筑周围的风环境进行仿真分析并与风洞实验结果对比,结果表明,数值计算能够较好预测建筑物周围气流流动情况。

随着建筑师和规划师对建筑群风环境的日益重视,对建筑群风环境进行预测仿真已逐渐成为规划设计中重要环节,以下介绍了当前最为流行的预测建筑群风环境的几种方法,并着重比较了各自的特点;鉴于数值模拟方法价廉、快速、信息多、不受条件限制等优点,本文采用了基于数值模拟方法的建筑群风环境优化设计的思路。

1. 直接数值模拟(DNS)^[43]

这是代价最昂贵的一种方法,因此在实际中较少使用。在 DNS 模型中,对整个湍流的运动范围(从大尺度到耗散尺度)求解 N—S 方程组。计算中需要估算、选择最小离散误差。这些方程组描述了湍流波动特性的所有细节。DNS 模型的优点在于清楚的定义了所有重要参数的条件,在理论上用数值方法解这些方程组是可行的。由于典型的最小耗散旋涡尺度是 1mm,所以网格尺寸也应该在同一数量级上,这使得网格点数目过大,以至于连小建筑物也无法处理。

尽管 DNS 模型对于研究湍流及湍流模型方面具有很大潜力,但目前也只能用于低雷诺数的情况。对于实际所感兴趣的高雷诺数情况,数值模拟湍流谱消散范围内的问题可能需要很多年才能完全解决。

2. 大旋涡模拟(LES)

大旋涡模拟是建立在容积平均 N—S 方程组基础上的,在工程领域内可应用于所有流体。LES 的目的是计算三维与时间有关的大尺度运动(它引起初始传输),同时对小尺度或子网格尺度运动简单建模(参数化)。LES 模型中,通过网格容积平均,计算域被分为可解域,也就是大尺度域、剩余域(子网格域),即小旋涡域。

所有尺度大于网格尺寸的运动都是可解的,包括周期蔓延旋涡。这种模拟不能区分旋涡引起的波动。网格尺寸越细,运动尺度便可分解得越细。不可分解的小尺度运动对于可分解的大尺度运动的影响需要建模进行研究。

最早用大旋涡方法来进行数值估算的是 **Deardorff**。在他的文章中,LES 方法被应用于水洞。后来引伸到对流边界层。这个方法可以在任何时刻“冻结”流体而产生整个流场速度、压力和各种湍流统计量。

LES 方法的最大缺点是当它应用于非均匀流动,如建筑物周围的流动时,就需要非常大的 CPU 时间,而对于非流线形物体,精确的 LES 结果需要非常细的网格和大的计算域。

3. 雷诺应力模拟(RSM)^[43]

雷诺应力模型通过分别对雷诺应力和湍流能量耗散解对流方程来计算传输效应。**Launder** 指出数值计算复杂流动最令人满意和有效的湍流模型是那些以雷诺应力近似方程解为基础的模型。这类方程最早由 **Rott** 提出,**Launder**^[44]则对三维流体提出了通用方法。**RSM** 是一种二阶矩闭合模型,以雷诺应力估算传输方程和任何标量通量为基础。共有七个方程,其中对雷诺应力方程有六个方程,还有一个耗散方程。**RSM** 模型只限于应用于大雷诺数情况,它最初的注意力集中在对应力和应变波动之间的校正给出较好的估计。由于壁面法则的局限性 **RSM** 的结果与实验数据之间的差异比较大。

4. $k-\varepsilon$ 模型

在旋涡粘性模型中,通过下式将雷诺应力与时均速度的梯度联系起来:

$$-\overline{u_i u_j} = \gamma_l \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

k 是湍流动能,旋涡粘性 γ_l 随时空的变化由湍流模型决定。一阶闭合中 γ_l 由长度尺度直接表述。在更为通用的湍流模型中,假设雷诺应力与主流线的应变率成正比。比例因子 γ_l 由对湍流动能和耗散 ε 两个传输方程的求解得到。

$k-\varepsilon$ 模型是双方程模型的一种。湍流的动能和长度尺度都由传输方程所决定。对长度尺度方程的演绎可通过对 N—S 方程组的处理来表示成不同的变量,也就是说可通过选取不同变量来确定长度尺度 l 。一般采用 $Z=k^m l^n$ 来选择湍流脉动的长度尺度,从而形成 $k-\varepsilon$ 、 $k-l$ 模型。所有这些变量的微分形式均类似,但对于靠近壁面的计算来说, $k-\varepsilon$ 模型是最好的。它包含了最少的项,较多的

边界层物理性质。对于数值估算湍流，Launder 和 Spalding 比较了三种不同 TKE(湍流动能)闭合方案，表明对于非流线形物体周围的流体， $k-\varepsilon$ 模型的模拟结果是最好的。

通过以上介绍不难看出，数值模拟技术对建筑群风环境进行模拟仿真，具有形象直观、方便快捷地对建筑群周围气流流动形成的微环境做出分析和评价的优点，这不仅便于各界人士了解和把握建筑群周边风环境，同时也是优化建筑群规划设计的有力工具。通过建筑师、规划师以及数值模拟计算工程师的协调努力，“艺术”与技术有机地结合，建筑群规划设计一定能朝着生态化与可持续的正确道路健康发展。由此我们将在下一章通过数值模拟的方法研究建筑群周围的风环境，我们有理由相信，沿着这条道路走下去，未来中国将会出现更多更好的建筑群。

§ 2-4 本章小结：

本章主要讨论了研究建筑群风环境的三种途径，通过总结对比各种方法的优劣性，我们提出了在本论文工作中使用数值模拟的方法研究建筑群周围的风环境。

第三章 高层建筑群风环境的数值模拟研究

从前面的介绍中我们知道由于建筑物的越顶气流、建筑物之间的绕流和建筑物之间的渠道效应,会使局部地区风速增大,影响建筑群周围的风环境,影响人们对环境的舒适感,甚至造成建筑附近的局部风害,这是当代城市规划和设计所不能忽视的问题,为了创造良好的城市风环境,避免环境所能造成的风害,因此有必要进行建筑群风环境的模拟研究。本章以数值计算的方法研究了高层建筑群的风环境。

§ 3-1 数值模拟研究高层建筑风环境的控制方程

在风环境研究中,一般情况下,由于风速和建筑结构的尺寸较大,雷诺数高,因而大多数的流动都是湍流;另一方面,常见的风速远小于声速,在流场计算时可把气体视为不可压流体。在本文中关注的是建筑物周围平均风速的变化,也即是建筑物周围长时间风速变化的一个平均值。鉴于上述情况,我们只考虑稳态时的情况,应用标准 $k-\varepsilon$ 模式模型封闭雷诺平均的 N—S 方程,可得到恒定流直角坐标下三维不可压流体的控制方程:

连续性方程为:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (3.1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (3.2)$$

湍动能方程为:

$$\rho \frac{\partial U_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \varepsilon \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{\partial U_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.4)$$

$$G_k = \mu_t$$

其中 P 是压力项, k 为湍流动能, ε 为湍流能量耗散率, μ_t 为湍流粘性系数; 在

建筑物绕流的计算中，通常我们取湍流模型的经验常数为： $C_\mu = 0.09$ ， $C_{\varepsilon 1} = 1.41 \sim 1.45$ ， $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

§ 3-2 控制方程的离散

将控制方程写成通用方程的形式：

$$\frac{\partial(\rho R U \Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho R V \Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho R W \Phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(R \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(R \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(R \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + R S_\Phi \quad (3.5)$$

这里， Φ 是通用变量， Γ 为广义输运系数， S_Φ 是源项， R 是体积率，其值在流体空间点上为1，在建筑固体空间点上为0，控制体为一六面体，将压强 P 、 K 、 ε 置于控制体中心，对控制体积分，则通用微分方程的离散形式为：

$$a_v \Phi_v = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_H \Phi_H + a_L \Phi_L + b \quad (3.6)$$

其中： $a_v = a_E + a_W + a_N + a_S + a_H + a_L$ ，

$$a_E = D_e A |P_e| + [-F_e, 0]$$

$$a_W = D_w A |P_w| + [-F_w, 0]$$

$$a_N = D_n A |P_n| + [-F_n, 0]$$

$$a_S = D_s A |P_s| + [-F_s, 0]$$

$$a_H = D_h A |P_h| + [-F_h, 0]$$

$$a_L = D_l A |P_l| + [-F_l, 0]$$

F_e 、 F_w 、 F_n 、 F_s 、 F_h 和 F_l 为对流强度， D_e 、 D_w 、 D_n 、 D_s 、 D_h 和 D_l 为扩散

率，且 $p_i = \frac{F_i}{D_i}$ ，称为派克里特数(Peclet数)， $b = (S_c + S_v \Phi_v) \nabla x \nabla y \nabla z$ 为控制体

上线性化源项。

函数 $A|P| = [0, (1 - 0.1|P|)^5]$ ，其中符号 $[A, B]$ 表示取 A, B 中的较大者。

§ 3-3 SIMPLE 方法

本文采用 SIMPLE 算法来实现流动的数值计算,它是求解压力速度耦合方程隐方法,这种方法是由 Patankar 和 Spalding[®]在 1972 年提出的,较多应用在求解不可压缩流动中。

其基本思想如下:对于给定的压力场,按次序求解流向速度和垂向速度的代数方程。由此所得到的速度场未必能满足质量守恒的要求,因而必须对给定的压力场加以修正。为此,把由动量方程的离散形式所规定的压力与速度的关系代入连续性方程的离散形式,从而得出压力修正值方程。由压力修正方程得出压力改进值,进而去改进速度,以得出在这一迭代层次上能满足连续性方程的解。然后用计算所得的新的速度值去改进动量离散方程的系数,以开始下一层次的计算。如此反复,直到获得收敛的解。

在本文的计算中,离散方程采用欠松弛迭代求解,其计算步骤如下:首先生成网格,将流场体积率置 1,建筑物体积率置 0。并给定初始猜测压力场;根据离散的动量方程求解猜测的速度场,由于猜测的压力场和求解的速度场不一定满足连续方程,由连续方程求解校正压力,并修正压力;求解校正速度和速度场及湍动量;判别是否收敛,如果不满足要求则将修正的压力作为新的猜测压力,重复上述过程直到得出收敛结果;最后求解建筑物所受压力。

§ 3-4 壁面函数法

需要指出的是, $k-\varepsilon$ 模式称为高 Re 数模型,适用于离开壁面一定距离的湍流区域,此时层流粘性系数 μ 相对于湍流粘性系数 μ_t 可以忽略不计;而对于壁面边界层内,由于流动的速度和边界层的厚度都是小量(相对于势流速度和特征长度),因此,边界层内湍流 Re 很低,必须考虑分子粘性的影响,此时系数 C_μ 与湍流 Re 有关,因此 k 、 ε 的方程都要作相应修改。因此处理壁面附近的区域,通常采用壁面函数法。

其基本思想可归纳如下:

(1) 假设在计算问题的壁面附近粘性底层以外的区域,无量纲速度分布服从对数分布律。由流体力学的知识,对数分布律为:

$$u^+ = \frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + B = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (3.7)$$

其中 $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ 为切应力速度;常数 $\kappa = 0.4 \sim 0.42$, $B = 5.0 \sim 5.5$ 。在这一定义中只有时均值 u 而没有湍流参数。为了反映湍流脉动的影响需要把 u^+ , y^+

的定义作进一步扩展:

$$u^+ = \frac{u(C_\mu^{1/4} k^{1/2})}{\tau_w / \rho} \quad (3.8)$$

$$y^+ = \frac{y(C_\mu^{1/4} k^{1/2})}{\nu} \quad (3.9)$$

(2) 在划分网格时, 把第一个内节点 P 布置到对数分布律成立的范围内。

(3) 第一个内节点与壁面之间区域的涡粘性系数 μ_t 按下式确定:

$$\tau_w = \mu_t \frac{u_p - u_w}{y_p} \quad (3.10)$$

这里 τ_w 由对数分布律确定, u_w 为壁面上的速度。据此式可导出第一个内节点上的 μ_t 的计算式, 在第一个内节点上与壁面相平行的流速应满足对数分布律, 即

$$\frac{u_p(C_\mu^{1/4} k_p^{1/2})}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[E y_p \frac{(C_\mu^{1/2} k_p)^{1/2}}{\nu} \right] \quad (3.11)$$

将上两式结合, 得到节点 P 与壁面间的湍流粘性系数 μ_t 为

$$\mu_t = \left[\frac{y_p(C_\mu^{1/4} k_p^{1/2})}{\nu} \right] \frac{\mu}{\ln(E y_p^+) / k} = \frac{y_p^+ \mu}{u_p^+} \quad (3.12)$$

其中 μ 为分子粘性系数。可以看出, 从计算上看壁面函数法的一个重要内容就在于确定壁面上的涡粘系数 μ_t 。

(4) 对第一个内节点 P 上 k_p 和 ε_p 的确定方法作出选择。 k_p 的值仍可按 k 方程计算, 其边界条件取为 $(\partial k / \partial y)_w = 0$ (y 为垂直于壁面的坐标)。至于壁面上的 ε 值, P 点的 ε 值不通过求解有限差分方程, 而是根据代数方程来计算。常用的一种方法是按混合长度理论计算此处的 l 。例如:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{1/2}}{\kappa y_p} \quad (3.13)$$

§ 3-5 风环境的数值模拟

3-5-1 计算模型

本文计算的高层建筑物实际高度是 180 米，建筑物以 2×2 形式等距排列组成，在不同的建筑物形状及来流攻角时，分别以 1.5 倍建筑边长及 2.5 倍建筑边长布置间距，这种布置方式往往也是实际高层建筑规划的常用布局。计算网格生成采用在建筑物附近用细网格，至边界处格距逐渐增大的拉伸网格系统，垂直网格从底往上逐渐增大，并且在我们关注的两个面对网格进行了局部加密，以达到我们期望的精度。

3-5-2 边界条件

(1)入口边界：风吹过地面时，受到地面上各种粗糙元（草、庄稼、森林、房屋建筑等等）产生的摩擦阻力作用而使风的能量减少因而风速减小，减小的程度随离地面的高度的增加而降低，形成上大下小的风速剖面，这一层受地球表面摩擦阻力影响的大气层称为大气边界层，城市建筑均处于大气边界层中，因此进行建筑风环境模拟研究必须模拟真实的大气边界层。不同的地面条件产生的大气边界层具有不同的特征，大气边界层特征主要包括平均风速剖面、湍流结构和温度层结等几个方面，大气边界层风速剖面符合幂指数分布规律，即：

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{z}{Z_0} \right)^\alpha$$

其中， U_0 、 Z_0 分别为参考点风速和高度。不同的地面条件，幂指数 α 不同，一般来说， α 在 0.14-0.40 内取值，本文计算的 $\alpha=0.16$ ， $U_0=10$ m/s， $Z_0=10$ m，

$$R_\tau = \frac{U_0 D}{\nu} = \frac{10 \times 45}{18.24 \times 10^{-6}} = 2.47 \times 10^7。$$

(2)出口边界：出口选在下游较远处，认为湍流达相对平衡，沿主流方向的速度梯度和压力梯度为 0，同时湍动能梯度和湍动能耗散率梯度也为 0。

(3)风场对建筑物的影响范围是一定的，把建筑物体积的 4-8 倍作为建筑物的计算范围

(4)计算的时候，把建筑物和地面看做固壁，近壁区采用壁面函数法设置；侧面和顶面看做对称类型的边界。

3-5-3 各种工况下高层建筑群风环境数值模拟结果及分析

工况一：截面为正方形，边长 45 米，群体间距为 1.5 倍建筑边长，风向为 0° 攻角。

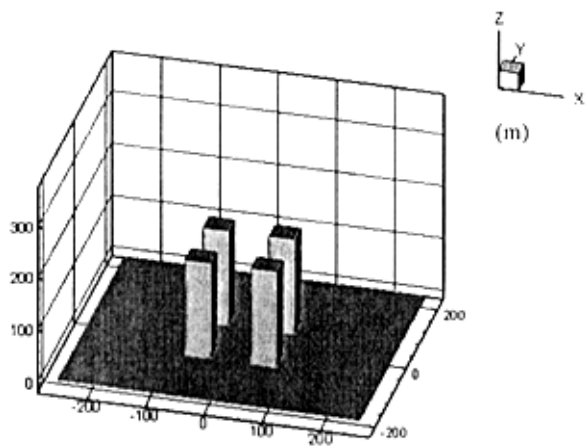
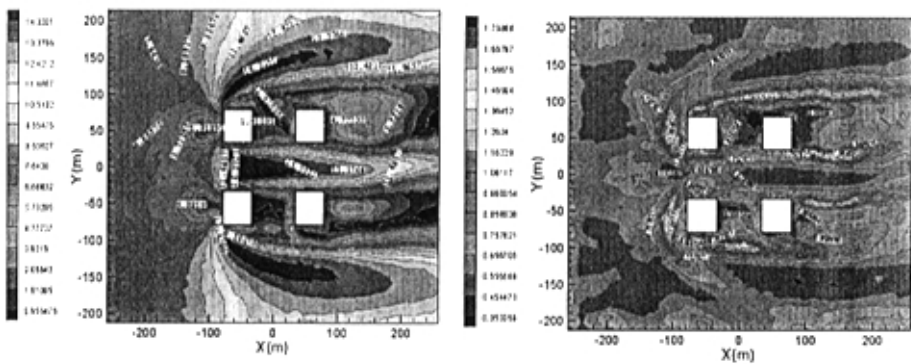
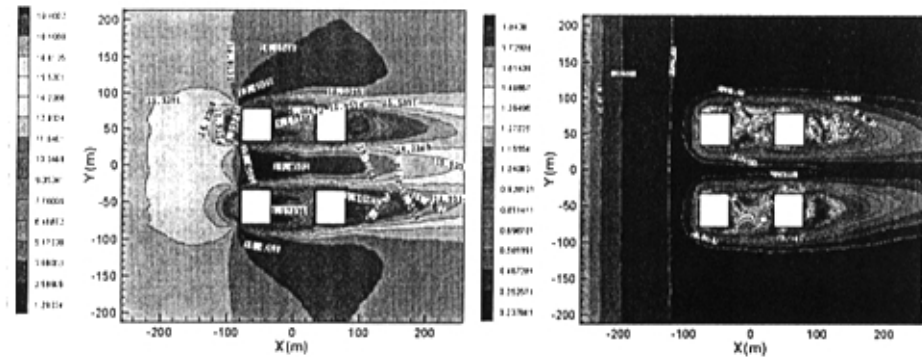


图 3.1 模拟工况一的示意图



(3.1a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.1b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图



(3.1c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.1d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

(1) 平均风速

图(3.1a)(3.1c)显示了平均风速在工况一情况下两个不同断面的等值分布图，

其中的风速为平均风速。由图(3.1a)(3.1c)中可看出,最大的平均速度区域主要发生在两个区域:一为迎风前排建筑中间的穿堂气流区, $Z=2\text{m}$ 处极值速比为1.45, $Z=160\text{m}$ 处极值速比为1.9,这是由于建筑群体间剧烈峡谷效应造成的;另一为前排建筑外侧角近旁区并延伸向后,在距建筑物0.5倍边长范围处出现极值速比系数,在 $Z=2\text{m}$ 处极值速比系数为1.43, $Z=160\text{m}$ 处极值速比系数为1.85,这个区域被称为分离剪切层流域,往往形成强风区域,造成风环境的不舒适。强风出现区域的风速比系数较为接近,这是由于建筑间距增大使得建筑间的峡谷效应减弱,这在我们前面做的风洞实验中得到验证^[31],然而在后排建筑角处并没有出现大的强风区域,这可能是因为前方建筑的遮蔽作用造成的。由于同样的原因,在前后排建筑中间以及后排建筑背风面均没有出现大的风速。

(2) 湍流度

图(3.1b)、(3.1d)显示了在工况一情况下不同断面湍流度值的等值分布图。由图可知,对于 $Z=2\text{m}$ 处有一块小的高端湍流度值区域出现在前排建筑的迎风角近旁,并且有一块狭长的高端湍流度区域紧贴着建筑物侧面向后区域。这些大的速度脉动与大范围的旋涡运动有密切关系,这些旋涡往往与剪切层的分离、马蹄形涡的形成有关。对于 $Z=160\text{m}$ 处,高端湍流度出现的位置基本上和 $Z=2\text{m}$ 处是一致的,在数值上比 $Z=2\text{m}$ 处要大。

工况二:截面为正方形,边长45米,群体间距为1.5倍建筑边长,风向为 45° 攻角。

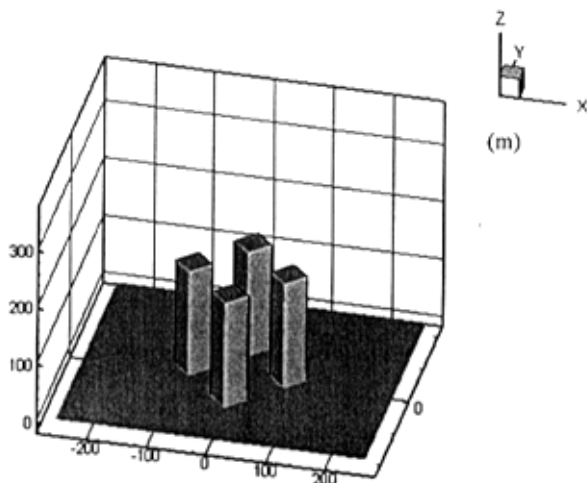
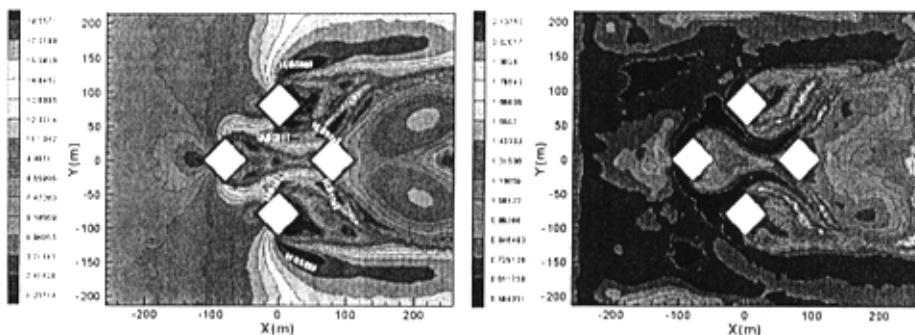
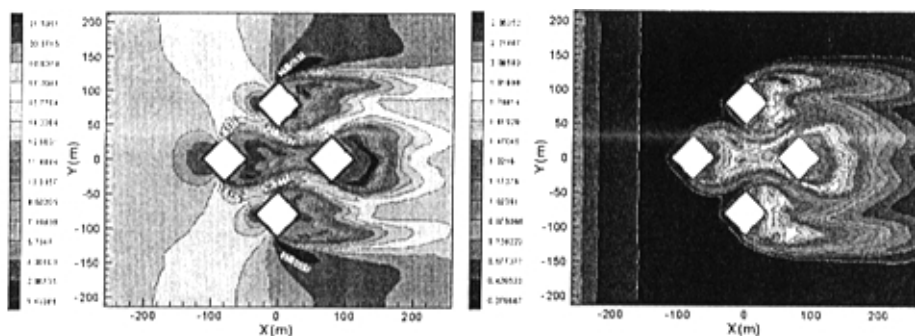


图 3.2 模拟工况二的示意图


 (3.2a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

 (3.2b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图

 (3.2c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

 (3.2d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

(1) 平均风速

由图(3.2a)(3.2c)可知,该工况最大风速区域发生在曲折街区内气流能直线穿透的位置, $z=2\text{m}$ 时最高速比值可达到 1.86, $z=160\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.15;另一强风领域位于边柱外侧角向后区域, $z=2\text{m}$ 时速比达到 1.85, $z=160\text{m}$ 时最大速比值 2.13,这在我们前面做的风洞实验中得到验证^[35]

(2) 湍流度

由图(3.2b)、(3.2d)可知,该工况最大湍流度出现在紧贴两边建筑外侧后方和建筑物的背风面,会造成风环境的不舒适。

工况三:截面为正方形,群体间距为 2.5 倍建筑边长,风向为 0° 攻角

(1) 平均风速

图(3.3a)、(3.3c)显示了平均风速在工况三情况下两个不同断面的等值分布图,其中的风速为平均风速。由图图(3.3a)、(3.3c)可以看出,最大的平均速度区域主要发生在两个区域:一为迎风前排建筑中间的穿堂气流区, $Z=2\text{m}$ 处极值速比为 1.34, $Z=160\text{m}$ 处极值速比为 1.9,这是由于建筑群体间剧烈峡谷效应造成的;另一为前排建筑外侧角近旁区并延伸向后,在距建筑物 0.5 倍边长范围处出

现极值速比系数，在 $Z=2\text{m}$ 处极值速比系数为 1.32， $Z=160\text{m}$ 处极值速比系数为

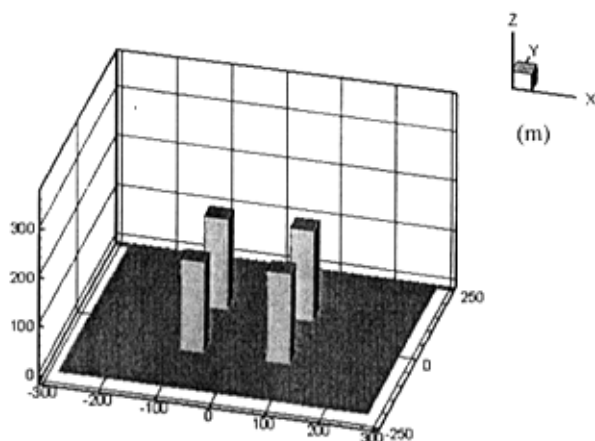
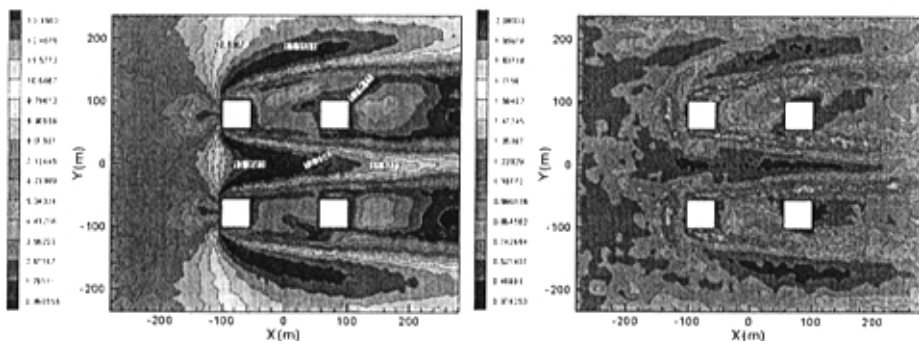
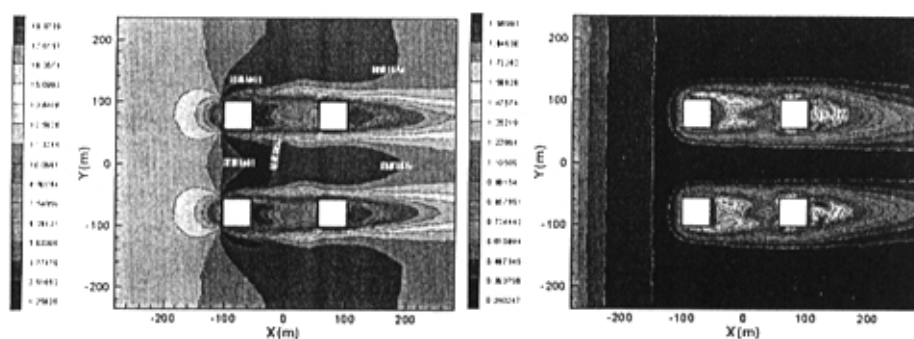


图 3.3 模拟工况三的示意图



(3.3a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.3b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图



(3.3c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.3d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

1.89，这个区域被称为分离剪切层流域，往往形成强风区域，造成风环境的不舒适。强风出现区域的风速比系数较为接近，这是由于建筑间距增大使得建筑间的峡谷效应减弱。然而在后排建筑角处并没有出现大的强风区域，这可能是由于前方建筑的遮蔽作用造成的。由于同样的原因，在前后排建筑中间以及后排

建筑背风面均没有出现大的风速。

(2) 湍流度

图(3.3b)、(3.3d)显示了在工况三情况下湍流度值的等值分布图。由图可知，有一块小的高端湍流度区域出现在前排建筑的迎风角近旁，并且有一块狭长的高端湍流度区域紧贴着建筑物侧面向后区域。这些大的速度脉动与大范围的旋涡运动有密切关系，这些旋涡往往与剪切层的分离、马蹄形涡的形成有关。

工况四：截面为正方形，群体间距为 2.5 倍建筑边长，风向为 45° 攻角

(1) 平均风速

由图(3.4a)、(3.4c)可知，该工况最大风速区域发生在曲折街区内气流能直线穿透的位置， $z=2\text{m}$ 时最大速比值可达到 1.81， $z=160\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.15，强风领域位于边柱外侧角向后区域， $z=2\text{m}$ 时速比达到 1.8， $z=160\text{m}$ 时最大速比值 2.0，相比该工况产生强风领域是出现在后方建筑侧角区域，这是由于最前方的建筑物对两边柱并没有很好的阻挡，风在边柱侧经过分离剪切作用加速后，在后方建筑边角处继续加速，造成速比值比边柱处大。

(2) 湍流度

由图(3.4b)、(3.4d)可知，该工况最大湍流度出现在紧贴两边建筑外侧后方和建筑物的背风面，这是由于分离剪切层引起的旋涡造成的，会造成风环境的不舒适。

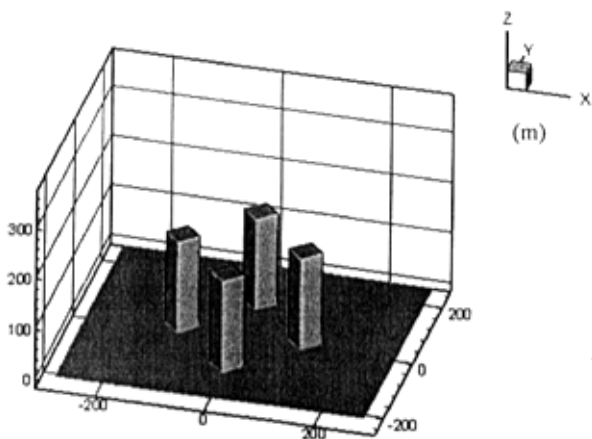
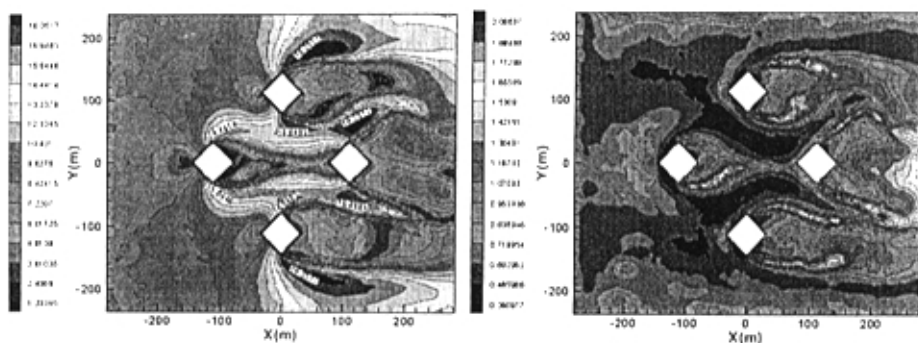
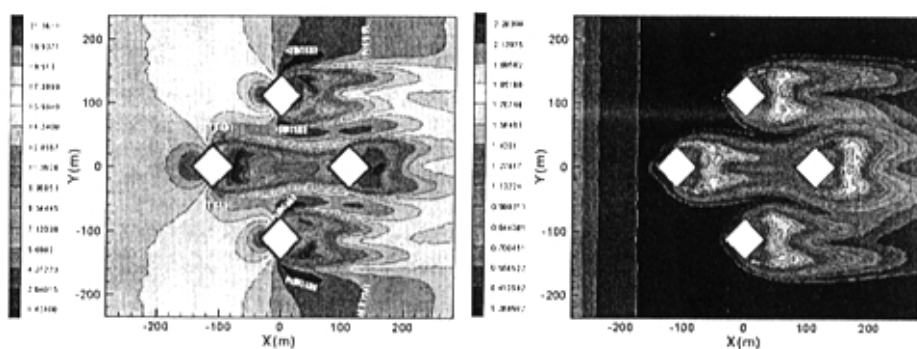


图 3.4 模拟工况四的示意图



(3. 4a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3. 4b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图



(3. 4c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3. 4d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

工况五: 截面为长方形, 长为 90m, 宽为 45m, 群体间距为 1.5 倍建筑边长, 风向为 0° 攻角

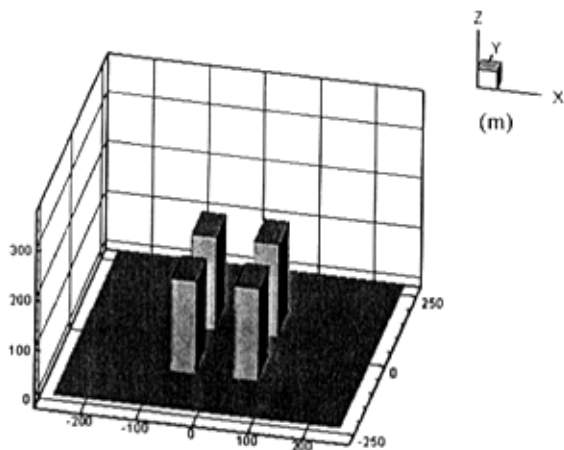
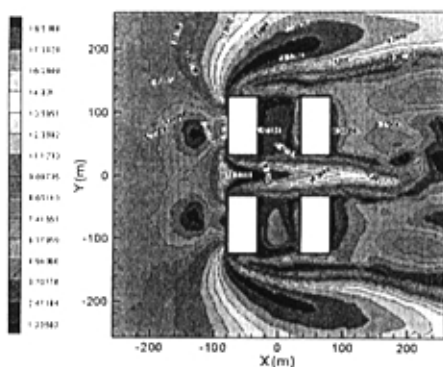
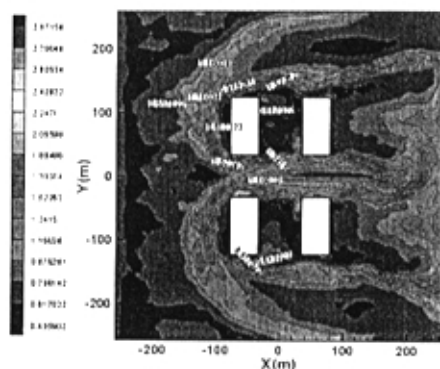
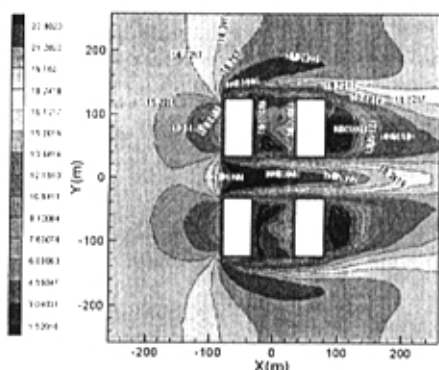
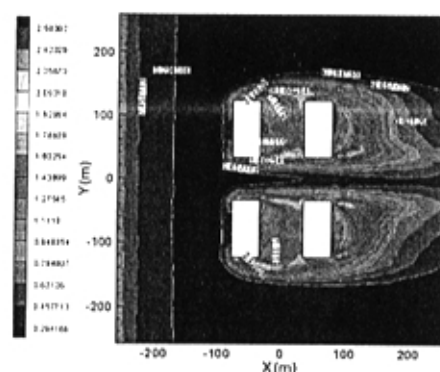


图 3.5 模拟工况五的示意图

(3.5a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(3.5b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图(3.5c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(3.5d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

(1) 平均风速

图(3.5a)、(3.5c)显示了平均风速在工况五情况下两个不同断面的等值分布图,其中的风速为平均风速。由图(a)(c)中可看出,最大的平均速度区域主要发生在两个区域:一为迎风前排建筑中间的穿堂气流区, $Z=2\text{m}$ 处极值速比为1.85, $Z=160\text{m}$ 处极值速比为2.28,这是由于建筑群体间剧烈峡谷效应造成的;另一为前排建筑外侧角近旁区并延伸向后,在距建筑物0.5倍边长范围处出现最大速比系数,在 $Z=2\text{m}$ 处极值速比系数为1.8, $Z=160\text{m}$ 处极值速比系数为2.26,这个区域被称为分离剪切层流域,往往形成强风区域,造成风环境的不舒适。然而在后排建筑角处并没有出现大的强风区域,这可能是因为前方建筑的遮蔽作用造成的。由于同样的原因,在前后排建筑中间以及后排建筑背风面均没有出现大的风速。

(2) 湍流度

图(3.5b)、(3.5d)显示了在工况五情况下湍流度值的等值分布图。由图可知,有一块小的高端湍流度值区域出现在前排建筑的迎风角近旁,并且有一块狭长的高端湍流度区域紧贴着建筑物侧面向后区域。这些大的速度脉动与大范围的旋涡运动

有密切关系，这些旋涡往往与剪切层的分离、马蹄形涡的形成有关。

工况六：截面为长方形，长为 90m，宽为 45m，群体间距为 1.5 倍建筑物宽，风向为 45° 攻角

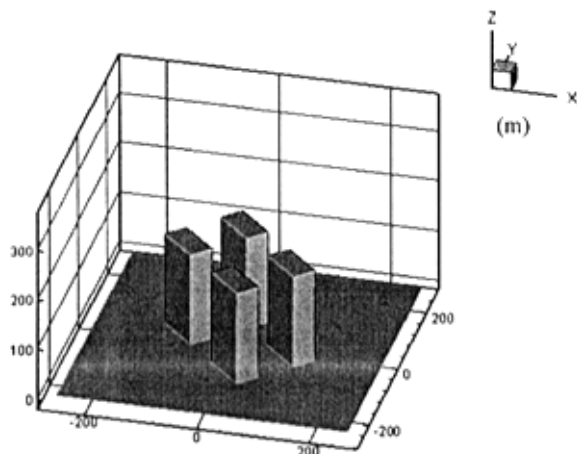
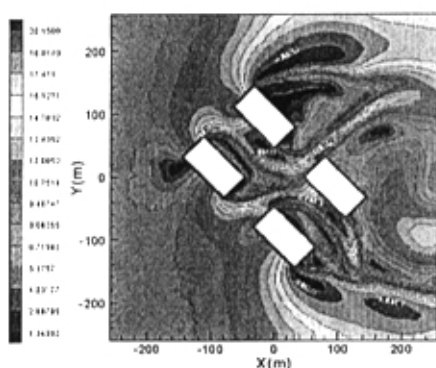
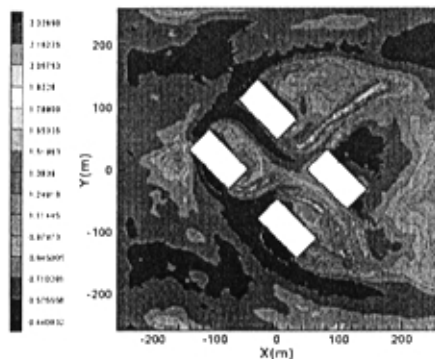


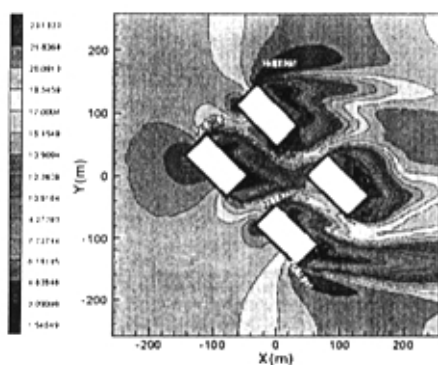
图 3.6 模拟工况六的示意图



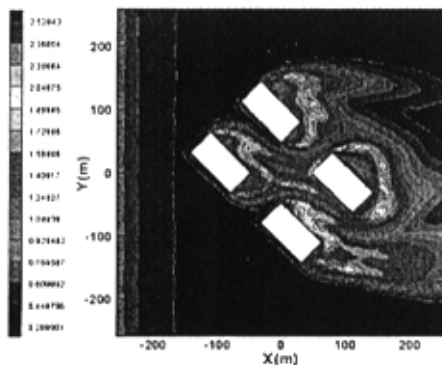
(3. 6a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)



(3. 6b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图



(3. 6c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)



(3. 6d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

(1) 平均风速

由图(3.6a)、(3.6c)可知, 该工况最大风速区域发生在边柱角外侧向后区域, $z=2\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.02, $z=160\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.32, 这也是由于分离剪切作用造成的。相比该工况曲折街谷区并没产生强风领域, 较大的风也是出现在边柱内侧角区域, $z=2\text{m}$ 时速比达到 2.01, $z=160\text{m}$ 时速比值达到 2.30, 这是由于最前方的柱对两边柱并没有很好的阻挡, 风在前方柱侧经分离剪切作用加速后, 在边柱内侧角处继续加速, 造成速比值也很大。由于建筑物长宽不等以及攻角的存在导致建筑群两侧最高风速比出现差别, 计算结果显示, 建筑物侧面的风速较大, 而正面则相对较小。

(2) 湍流度

由图(3.6b)、(3.6d)可知, 该工况最大湍流度出现在紧贴两边建筑外侧后方以及建筑物的后方, 这是由于分离剪切层引起的旋涡造成的。

工况七: 截面为长方形, 群体间距为 2.5 倍建筑边长, 风向为 0° 攻角

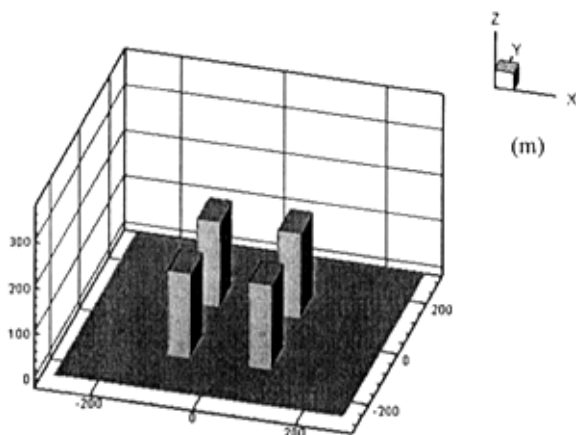
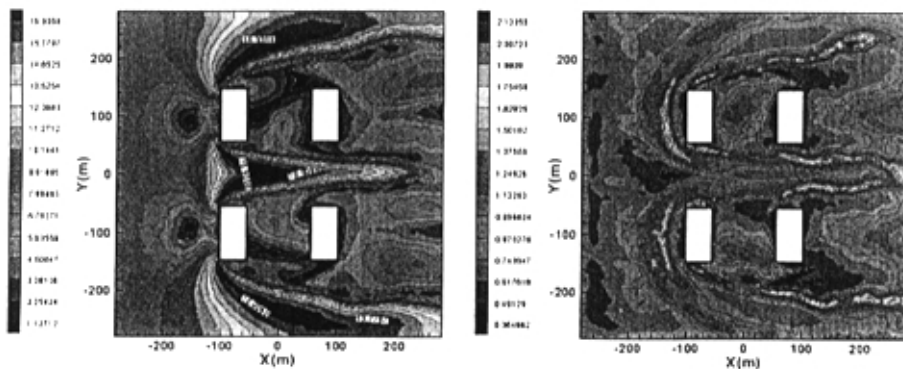
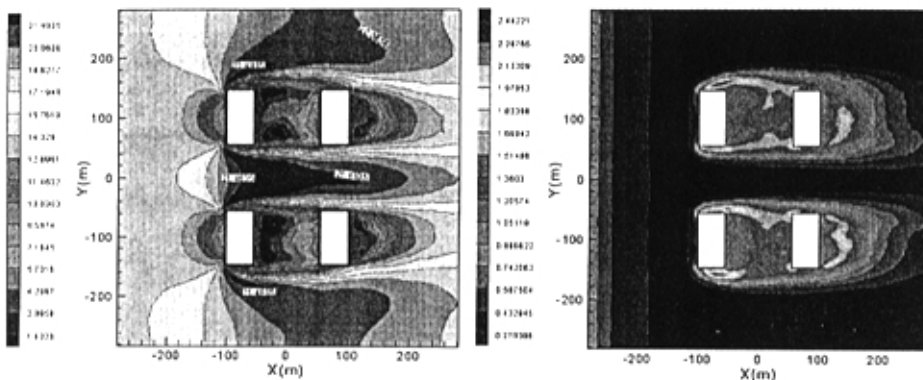


图 3.7 模拟工况七的示意图



(3.7a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.7b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图


 (3.7c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (3.7d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

(1) 平均风速

图(3.7a)、(3.7c)显示了平均风速在工况七情况下两个不同断面的等值分布图，其中的风速为平均风速。由图(a)(c)中可看出，最大的平均速度区域主要发生在两个区域：一为迎风前排建筑中间的穿堂气流区， $Z=2\text{m}$ 处极值速比为 1.69， $Z=160\text{m}$ 处极值速比为 2.15，这是由于建筑群体间剧烈峡谷效应造成的；另一为前排建筑外侧角近旁区并延伸向后，在距建筑物 0.5 倍边长范围处出现极值速比系数，在 $Z=2\text{m}$ 处极值速比系数为 1.70， $Z=160\text{m}$ 处极值速比系数为 2.16，这个区域被称为分离剪切层流域，往往形成强风区域，造成风环境的不舒适。然而在后排建筑角处并没有出现大的强风区域，这可能是因为前方建筑的遮蔽作用造成的。由于同样的原因，在前后排建筑中间以及后排建筑背风面均没有出现大的风速。

(2) 湍流度

由图(3.7b)、(3.7d)显示了在工况五情况下湍流度值的等值分布图。由图可知，有一块小的高端湍流度值区域出现在前排建筑的迎风角近旁，并且有一块狭长的高端湍流度区域紧贴着建筑物侧面向后区域。这些大的速度脉动与大范围的旋涡运动有密切关系，这些旋涡往往与剪切层的分离、马蹄形涡的形成有关。

工况八：截面为长方形，长为 90m，宽为 45m，群体间距为 2.5 倍建筑边长，风向为 45° 攻角

(1) 平均风速

由图(3.8a)、(3.8c)可知，该工况最大风速区域发生在边柱角外侧向后区域， $z=2\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.03， $z=160\text{m}$ 时最高速比值可达到 2.24，这也是由于

分离剪切作用造成的。相比该工况曲折街谷区也产生强风领域，较大的风也是出现在边柱内侧角区域， $z=2\text{m}$ 时速比达到 2.03， $z=160\text{m}$ 时速比值达到 2.24，这是

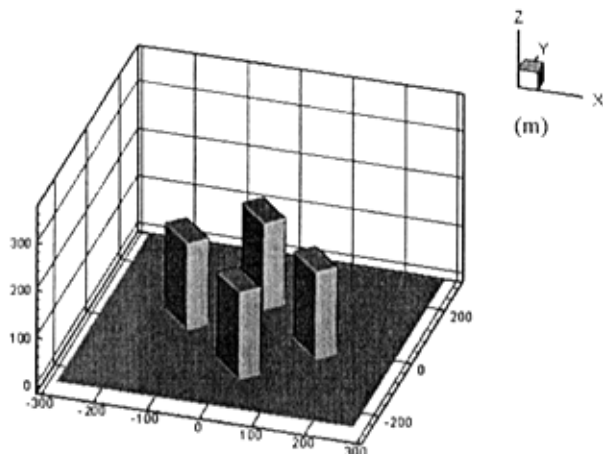
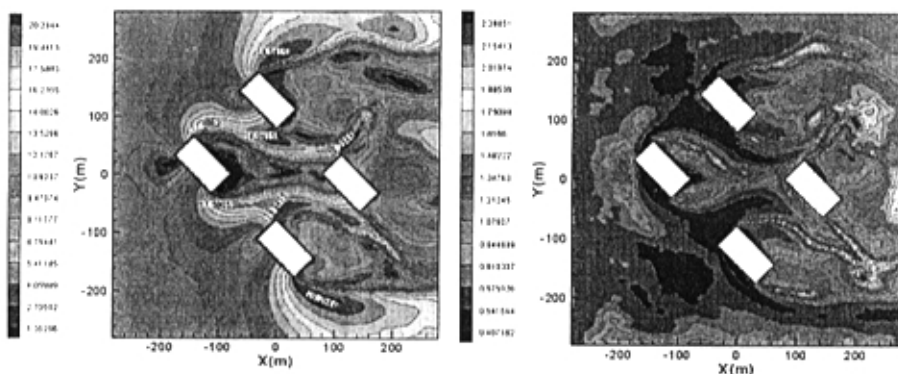
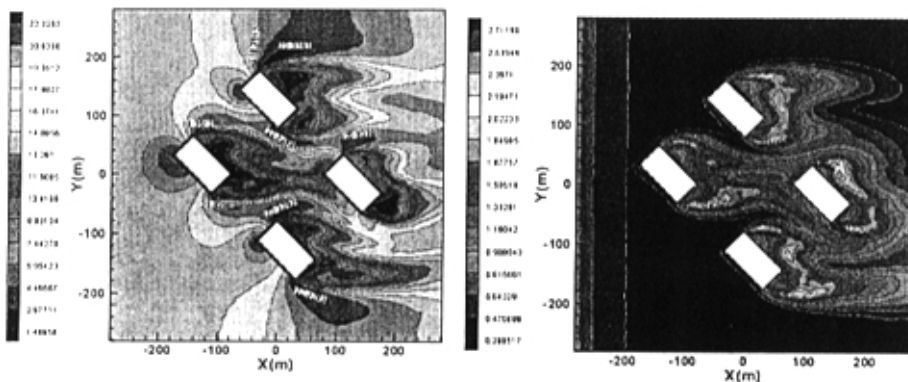


图 3.8 模拟工况八的示意图



(3.8a) $z=2\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.8b) $z=2\text{m}$ 时的湍流度等值线图



(3.8c) $z=160\text{m}$ 时的速度等值线图 ($\text{v}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3.8d) $z=160\text{m}$ 时的湍流度等值线图

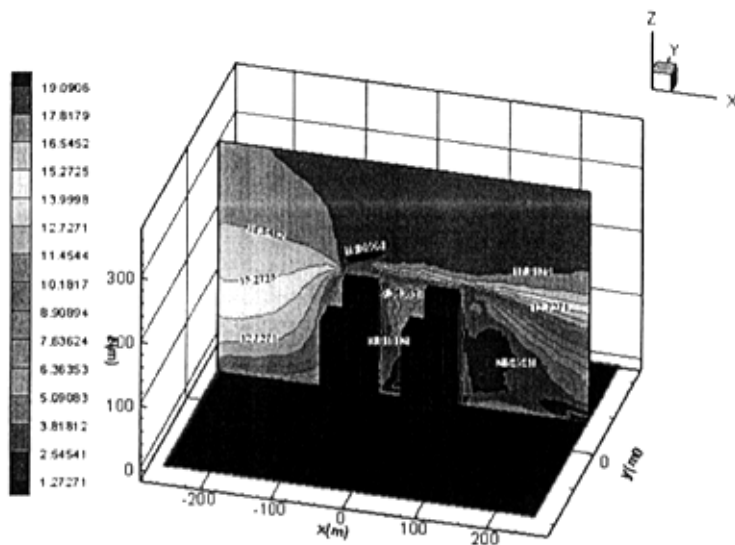
由于最前方的柱对两边柱并没有很好的阻挡，风在前方柱侧加速后，在边柱内侧

角处继续加速,造成速比值也很大。与工况六的结果近似,建筑物侧面分离区的最大速度稍大于正面分离区的最大速度。

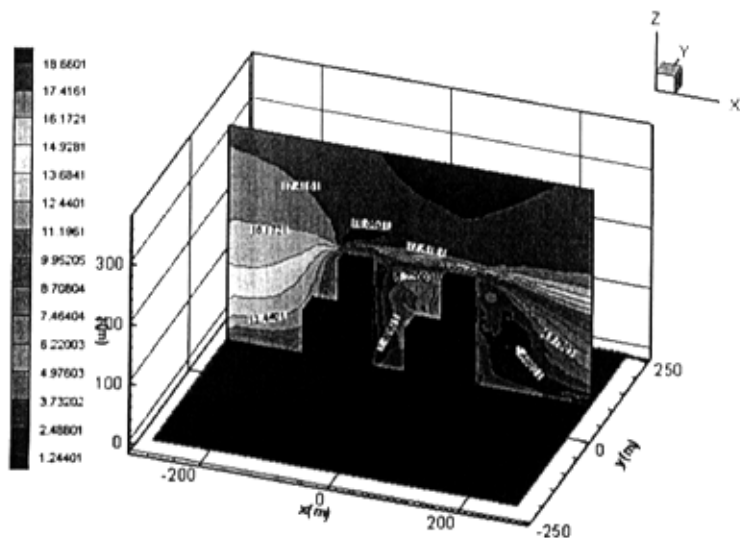
(2) 湍流度

由图(3.8b)、(3.8d)可知,该工况最大湍流度出现在紧贴两边建筑外侧后方和曲折街谷区的出口处,即尾柱边角附近区域,这是由于分离剪切层引起的旋涡造成的。

3-5-4 纵剖面模拟结果对比



图(3.9a) 1.5倍间距工况纵剖面等值线图



图(3.9b) 2.5倍间距工况纵剖面等值线图

图(3.9a), (3.9b)分别显示了平均风速在 1.5 倍间距和 2.5 倍间距情况下纵剖面的速度等值线图, 其中的风速为平均风速。可看出, 在上风建筑的上方附近风速较大, 气流在此处发生分离; 同样在下风建筑的迎风侧上方速度增大, 气流在此处也发生分离, 往往形成强风区域, 造成风环境的不舒适; 在上风建筑的背风侧的上部分, 平均速度明显减小, 表明在此处可能存在另一个旋涡中心。建筑群峡谷中心平均速度都最小, 而在贴近底板和街道模型的上部平均速度不同程度增大, 表明街谷内有一稳定的旋涡流场。

然而在前后排建筑中间和后排建筑后方并没有出现大的强风区域, 这可能是因为前方建筑的遮蔽作用造成的。综合各模型街道的计算结果发现, 建筑群峡谷中的平均速度分布形态相差较大。表明几何结构对街道峡谷流场具有决定性作用, 而来流的大气边界层的性质影响较小。

§ 3-6 数值模拟结论

经过初步分析, 可得到如下结果:

1. 角度变化的比较

45° 攻角的工况出现的风环境最大风速值一般比 0° 攻角工况要大。其中 45° 攻角工况二、工况四, 工况六、工况八的极值速比分别为 2.14, 2.08, 2.18, 2.15, 即有了高层建筑后风速增大到原来风速的 2.14, 2.08, 2.18, 2.15 倍, 而对应 0° 攻角的工况是 1.85, 1.71, 1.87, 1.84。 45° 攻角比 0° 攻角提高了 20—50%。

2. 最大风速区出现的区域比较

0° 攻角工况最大风速往往出现在建筑物的穿堂区域, 其次是迎风角区。这往往是由于建筑群体间剧烈的峡谷效应造成的, 速比最大可达到 2.64(即有了高层建筑后风速值将提高到原来风速的 2.64 倍)。

45° 攻角工况最大风速往往出现在建筑物的迎风角区, 其次是穿堂区。这主要是由于 45° 攻角工况的峡谷穿堂区并非如 0° 攻角工况整个贯通, 来流风受到建筑物迎风面的阻挡变向产生了能量的损失, 而在迎风角区则由于剪切层的分离对自由流的压束而造成了强风区域。

3. 不同建筑间距的比较

分析各种工况得到的结果是, 建筑间距与风速值成反比, 这种现象在 45° 攻角工况和 0° 攻角工况都产生了。一是高层建筑群间距较大, 有利于通风换气, 二是由于高层建筑的作用, 将上空的新鲜空气导入街区的下部, 从而促进了空气

更新,降低了污染物质的浓度。

4. 不同横截面形状建筑的比较

一个横风向宽度很大的高大建筑物,将造成强而阵性的“拐角风”,从而引起严重的“不安全”的风环境问题。对于本问数值模拟的长方体建筑物模型,极值速比很大,可达到 2.32。此外,由于建筑物横风向宽度大,在建筑物的前方还会因空气的阻塞而出现一个风速的骤变区域,即造成“不舒适”的风环境问题。

§ 3-7 本章小结

本章我们应用标准 $k-\varepsilon$ 模式数值模拟了不同工况下建筑群的风环境,主要得到了以下一些成果:主导风向相对于建筑物的攻角变化、高层建筑群各楼之间的间距变化、不同的建筑物横截面尺寸及形状对建筑群风环境的影响,并且总结了建筑群最大风速区出现的区域。最后对比了不同间距建筑群纵截面的平均风速,结果表明,几何结构对街道峡谷流场具有决定性作用。

第四章 陆家嘴地区某楼群风环境分析

§ 4-1 实测背景

上海浦东陆家嘴地区位于浦东新区的黄浦江畔。该地区将建成国内最大的金融贸易中心。本论文选取浦东大道与浦东南路交叉口中国人民银行大厦地块内 8 幢超高层建筑为研究对象。选择此方案主要出于以下几点考虑:

- 该地块附近高层建筑林立、密度大,附近还有两幢大体量超高层建筑:九十五层 460 米高即将成为世界第一高楼的环球金融中心(在建)和八十八层 420.5 米高的金茂大厦,因此该地区的风环境至关重要。
- 中国人民银行地块内的高层建筑都是办公楼。平面形式比较复杂,排列位置为正对的 2×4 矩阵,是较为典型的高层建筑群体规划方案,具有一定的代表意义,第三章的研究内容正好可以应用到本章的分析中。
- 地段的定位高,由于该地块的定位为国际金融中心,创造周围舒适风环境非常必要,这将直接影响到该地块内办公人员的环境舒适度。

§ 4-2 实测概要

1. 实测地点概况

实测地块位于浦东陆家嘴金融贸易区浦东南路与浦东大道交汇点处,该地块高层建筑林立,附近还将建造世界最高的建筑——环球世贸中心。目前整个地块由八幢高层建筑组成,分别是中国人民银行大厦(高 42 米)、上海招商局大厦(高 170 米)、新上海国际金融大厦(高 165 米)、世界金融大厦(高 187 米)、京银大厦(高 180 米)、华能联合大厦(高 180 米)、中商大厦(高 140 米)和森茂大厦(高 187 米)、具体位置见图 4.2。

2. 实测内容(平均风速、地点)

- 参考风速选取

测点 1 和测点 2 分别位于森茂大厦和中商大厦前部,根据现场实勘,两测点前方无高层和多层建筑,因此本次实测选用该迎风面前的测点为未受干扰的参考风速点。

- 角区气流测量

测点 3、5、6、8、9 为本次选用的角区气流测点,用于测量森茂大厦、中商

大厦、华能联合大厦、新上海国际金融大厦、世界金融大厦在西北偏西风作用下的角区气流状况。

• 穿堂气流测量

测点 4、7、10 为本次选用的穿堂气流测点，用于测量森茂大厦与华能联合大厦、京银大厦与世界金融大厦、中国人民银行大厦与上海招商局大厦之间的街谷在西北偏西风作用下的穿堂气流状况。

3. 使用风速计

使用的风速计为 DEM6 型轻便三杯风向风速计，可用于测量 0° — 360° 风向在一分钟时间内的平均风速，测量风速范围为 1~30m/s。

每一个测点的测量时间为一分钟、共测量 5 次，取算术平均值。

4. 实测结果

本实测时间选在 2001 年 1 月 5 日，与龙华气象站的冬季典型代表月份一致。当天气象站预报主风向是西北风，风力 5~6 级，阵风 7~8 级；在陆家嘴实地测量风向是西北偏西风，符合前一章数值模拟 45° 来流的工况，所以实测结果可与数值模拟结果互相参照。

每一测点对应实测风速平均值及与参考来流风速的速比系数如下：

测点 1: $U_{\text{参考}1} = 2.5\text{m/s}$

测点 2: $U_{\text{参考}2} = 2.5\text{m/s}$

所以选取参考风速值 $U_{\text{参考}} = 2.5\text{m/s}$

表一：测点实测风速值以及与来流风速的速比系数

$U_{\text{实}}$	m/s	$U_{\text{实}}/U_{\text{参}}$	$U_{\text{实}}$	m/s	$U_{\text{实}}/U_{\text{参}}$
第 3 点	2.5	1.00	第 7 点	3.5	1.80
第 4 点	3.5	1.80	第 8 点	3.0	1.70
第 5 点	4.7	1.88	第 9 点	4.9	1.96
第 6 点	4.3	1.70	第 10 点	4.8	1.92

§ 4-3 数值模拟模型与测点定位

本章数值模拟的的陆家嘴高层建筑群其横截面的结构如图 4.1, 取建筑物实

体按 1:1 进行模拟,在数值方法上仍按照上一章的方法,在来流风向上取 0° 和 45° 攻角进行模拟,整个模拟按不同来流风向,分为两组进行。

数值模拟的来流风速为不受建筑物影响的远处风速 $U_0=10\text{m/s}$,在模拟的时候取了测点等同高度(2m)不受建筑影响的一点来流风速值做为参考风速,以它作为特征速度对数值模拟得到的测点平均风速进行无量纲化,并以此速比系数作为直观的分析参数。速比系数表示了 in 高层建筑建成后当地的风速与原来没有建筑时风速的比值,用于反映高层建筑对当地风环境的影响。

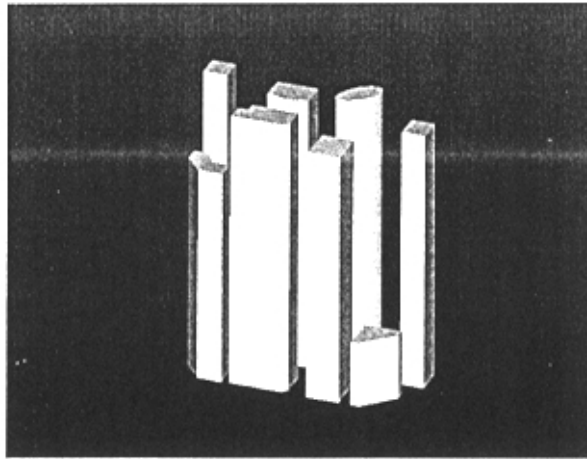


图 4.1 陆家嘴某楼群示意图

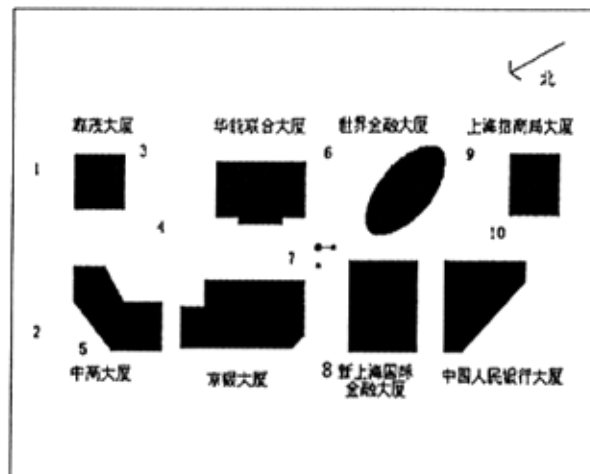
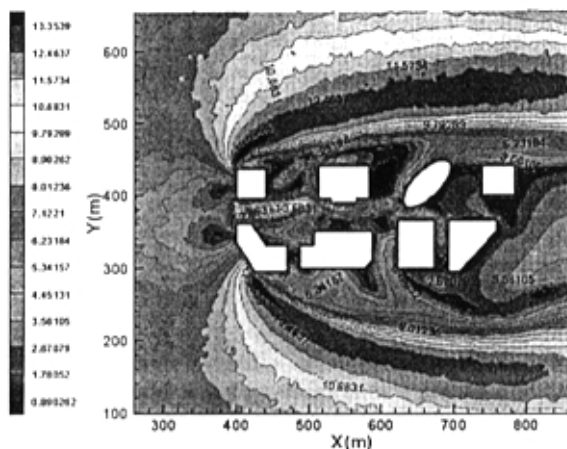


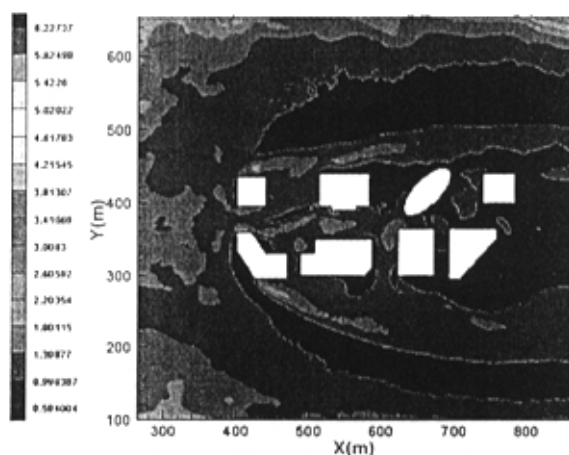
图 4.2 陆家嘴某楼群横截面示意图

§ 4-4 数值模拟结果与分析

工况一： 0° 风向



图(4.2a) $z=2\text{m}$ 时速度等值线图



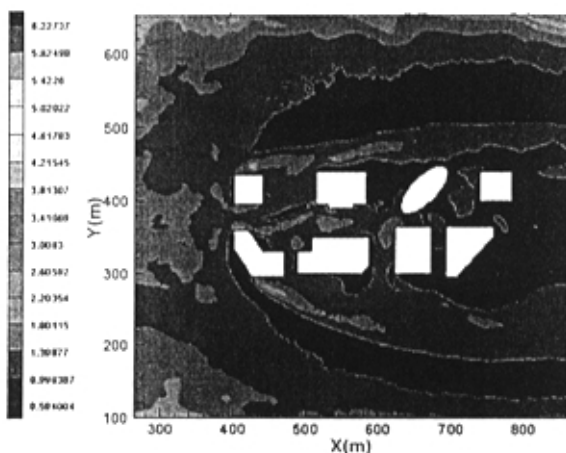
图(4.2b) $z=2\text{m}$ 时湍流度等值线图

平均风速：由图(4.2a)可知，最大的平均风速区域主要集中在三个部位：森茂大厦外侧角区附近，最高速度达到 13.36m/s ，速比系数为 1.73，这主要是由于角区分离剪切作用形成的。另一处为中商大厦外侧角区后方，最高速度达到 14m/s 左右，速比系数为 1.81，要高于森茂大厦的角区风速，这主要是因为森茂大厦是正对着来流方向，而中商大厦的主体高层呈 45° 角向着来流风。根据四方柱建筑群的研究结果： 45° 攻角的工况出现的风环境最大风速值一般比 0° 攻角要大，这与前面数值模拟结果正好互为验证；最后一处为中商大厦与森茂大厦的中间峡谷区域，其最高风速达到 12.48m/s ，速比系数为 1.61，要分别低于外侧角区风速，这是由于峡谷分别由两幢不同迎风角度建筑构成，没有形成贯通性能好的标准峡

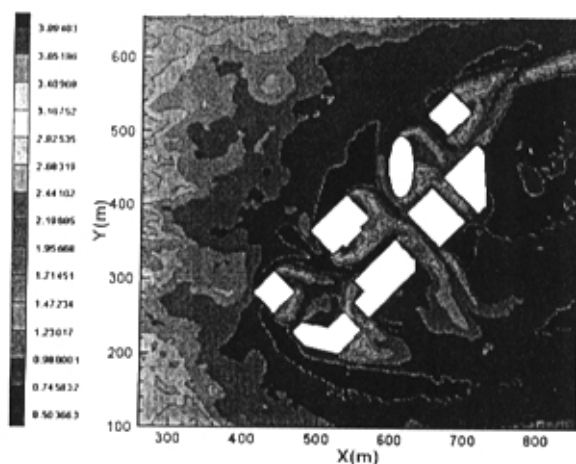
谷。根据四方柱研究结果：有 45° 角建筑工况的最大风速区出现在建筑物外侧角，这里又得到验证。在后面的几排建筑中间均没有出现强风区，这可能是因为第一排建筑的遮蔽作用造成的，而在建筑物的外侧区由前至后风速依序递减，但都要高于建筑群中间区域的风速。

湍流度：据图(4.2b)可以看出，在两米行人高度湍流度值区域主要出现在建筑群中心区也就是穿堂风区域，并且建筑群两侧近分离区有一块狭长的高湍流度区域紧贴着建筑物侧面向后区域，这个原因是显而易见的，由于来流方向为零攻角，而且各幢建筑物表面并非几何规则的，所以在这些大涡旋运动剧烈的地方湍流度较大。

工况二： 45° 风向



图(4.3a) $z=2\text{m}$ 时速度等值线图



图(4.3b) $z=2\text{m}$ 时湍流度等值线图

平均风速：由图(4.3a)可知，较大风速出现区域共有五处，其中一处位于森茂大厦外侧角区，最大风速达到 11.14m/s，速比系数为 1.41，另一处在中商大厦外侧后方角区，最大风速达到 17.37m/s，速比系数为 2.24。在世界金融大厦外侧角区风速最大达到 14.86m/s，风速比系数为 1.92；这两侧都是由于分离剪切作用而形成的加速风，同样验证 45° 攻角角区风速大于 0° 攻角。在中商大厦和森茂大厦中间处最大风速比系数达到 1.2，同样验证不规则峡谷风要小于同样工况的外侧角区风。该工况的最大风速出现在招商银行外侧角区，风速达到 17.39m/s，数值达到 2.25，这又一次验证了四方柱 45° 攻角时产生的结果：即 45° 攻角工况最大风速出现在建筑外侧角区，其次是峡谷影响区；由于其他四处均受到一部分后方建筑的影响，而招商银行后方无建筑影响，可以形成良好的贯通，所以造成了大风速的发生。

湍流度：据图(4.3b)行人高度湍流度等值线图可以看出，湍流度交大的区域出现在各个建筑物边角的分离区以及各建筑物之间的街谷区。由于此建筑群模型远比第三章各算例模型复杂，因此，计算所得到的流场也复杂得多。总之，从计算结果可以看出，不论是来流零攻角还是来流方向与建筑群有一定夹角，此时建筑群内部街谷区和建筑群周围流场近区都是风场活动较剧烈的区域，也就是不适合频繁活动的区域。

§ 4-5 实测与数值模拟比较

因为计算选取初值进口速度是 10 米高度，在经过我们换算后得到的 2 米高度的速度，这样我们就可以得到 2 米高处的速比系数如下：

表二：测点实测风速比系数与数值模拟风速比系数

测点	实测值	数值模拟值	测点	实测值	数值模拟值
第 3 点	1.00	1.11	第 7 点	1.40	1.91
第 4 点	1.80	1.41	第 8 点	1.20	1.27
第 5 点	1.88	2.24	第 9 点	1.96	2.10
第 6 点	1.70	1.68	第 10 点	1.92	2.04

由此可见，大部分的数值结果与实测都较为接近，数值模拟对风环境的预估较正确。

§ 4-6 风环境舒适性简略评价

地面风场资料如表三所示，表中所列即为上海市(龙华测站)1961 年—1999

年风向频率和平均风速的资料。

表三：

季 节 风 速		一月	四月	七月	十月	全年
N	P	7	6	2	5	5
	V	3.3	3.0	2.6	2.4	3.0
NNE	P	8	5	2	7	6
	V	3.2	3.6	3.0	2.9	3.3
NE	P	7	6	2	10	7
	V	3.1	3.2	2.2	3.0	3.3
ENE	P	6	6	4	11	6
	V	2.9	3.6	2.8	3.1	3.5
E	P	7	10	12	10	10
	V	2.8	3.5	3.5	2.6	3.2
ESE	P	4	13	13	8	10
	V	2.7	3.7	3.6	2.6	3.2
SE	P	4	13	12	6	9
	V	2.6	3.5	3.2	2.6	3.1
SSE	P	2	9	15	2	8
	V	2.8	3.6	3.3	2.4	3.4
S	P	2	5	12	3	4
	V	1.9	2.4	2.6	1.8	2.8
SSW	P	2	3	7	1	3
	V	1.5	2.0	3.0	1.6	2.4
SW	P	2	2	6	2	2
	V	2.4	1.7	2.9	1.7	2.2
WSW	P	2	4	5	2	3
	V	2.0	2.0	2.5	1.9	2
W	P	5	4	4	4	4
	V	2.3	2.7	2.9	1.9	2.5
WNW	P	16	7	3	10	8
	V	3.1	3.3	3.1	2.9	3.3
NW	P	12	4	2	8	7
	V	3.2	3.2	1.8	2.8	2.8
NNW	P	9	3	2	5	5
	V	3.1	3.4	2.1	2.7	3.1

从表三中可见：上海市全年主导风向是东南偏东风(ESE)，它与临近风向(E、SE、SSE)合计频率为 37%；次盛行风是西北偏西风(WNW)，它与临近风向(包括 NW)合计频率为 15%；静风频率为 3%，全年平均风速为 3.1 米/秒。

在掌握了当地的风气象资料和数值模拟预估结果后，我们就可以对建筑群周

围的风环境状况作出评估。实际的统计资料 and 评价步骤非常复杂，这里限于工作量和研究的深度，仅就个别主导风向情况的风环境结合当地风气象简表进行简单的评估。

1. 主导风向的选取：

由上表可知道，上海市全年主导风向是东南偏东风(ESE)，次盛行风是西北偏西风(WNW)。但由于东南偏东风的发生季节多为夏季，虽然频率不高，却不致引起太多不适。而次盛行风西北偏西风向的发生季节多为冬季，此时天气寒冷，往往会造成不适。因此，本文选取冬季(以一月为代表)作为评价季节，选取的评价风向为西北偏西风。这个风向正好与数值模拟在 45° 攻角时工况接近，可以直接运用数值模拟的结果。

2. 强风领域关注点的选取及数值模拟的等效速比系数、湍流度值

$$\frac{U_{equiv}}{U_{ref}} = K$$

$$\text{式中: } U_{ref} = U_0 \left(\frac{Z_{ref}}{Z_0} \right)^\alpha = 7.73 \text{ m/s}$$

其中 U_{equiv} 为数值模拟建筑物周围 $Z=2\text{m}$ 处风速值， U_{ref} 为不受建筑物影响的 $Z=2\text{m}$ 处的风速值。

经过计算的各点等效风速比系数如表四：

表四：各点速比系数

关注点	速比系数	湍流度	关注点	速比系数	湍流度
第3点	1.11	0.1	第7点	1.91	0.3
第4点	1.41	0.3	第8点	1.27	0.43
第5点	2.30	0.36	第9点	2.10	0.1
第6点	1.68	0.3	第10点	2.04	0.2

3. 风环境简略预估

为了简化问题，假设来流风速 U_{ref} 就是气象台的风速，冬季西北偏西风的发生频率是 16%，风速为 3.1m/s。

$$\text{由于速比系数 } K = \frac{U_{equiv}}{U_{ref}}$$

$$\text{而 } \frac{U_{equiv}}{U_{ref}} = \frac{U_{ref}}{U_{ocf}} \times \frac{U_{equiv}}{U_{ref}} \quad \text{且 } \frac{U_{ref}}{U_{ocf}} = \left(\frac{Z_{ref}}{Z_{10}} \right)^{0.16} = 0.773$$

$$\text{所以: } U_{equiv} = \frac{U_{ref}}{U_{ocf}} \times \frac{U_{equiv}}{U_{ref}} \times U_{ocf}$$

这里由于数值模拟参考风速选择行人高度且未受周围建筑干扰处,而气象站的地面粗糙度与之相近,所以 $Z_{ref}=2$ 米^[45],忽略粗糙度变化的影响,得到结果如下:

表五: 等效风速值

	点 3	点 4	点 5	点 6	点 7	点 8	点 9	点 10
$U_{equiv} \text{ (m/s)}$	2.66	4.31	5.51	4.02	4.57	3.04	5.03	4.89

5. 风环境评价

将上述各关注点得到的等效风速值及风气象资料中该风向发生的频度,结合一定的风舒适性准则就可以对给定的建筑群风环境作出评价。

这里我们参照同纬度、海洋性气候的美国旧金山市风舒适性准则(5m/s, 10%频率)进行简略评价。

1. 对测点 3, 在实际西北偏西风时风速为 2.66m/s, 该风向对应全年发生的频度为 8%, 此风向符合规定的舒适指标。
2. 对测点 4, 在实际西北偏西风时风速为 4.31m/s, 该风向对应全年发生的频度为 8%, 此风向较接近规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生不舒适。
3. 对测点 5, 在实际西北偏西风时风速为 5.51m/s 风向对应全年发生的频度为 8%, 此风向超出规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生严重不舒适。
4. 对测点 6, 在实际西北偏西风时风速为 4.02m/s 对应全年发生的频度为 5%, 此风向较接近规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生不舒适。
5. 对测点 7, 在实际西北偏西风时风速为 4.57m/s 该风向对应全年发生的频度为 5%, 此风向较接近规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生不舒适。
6. 对测点 8, 在实际西北偏西风时风速为 3.04m/s, 该风向对应全年发生的频度为 8%, 此风向符合规定的舒适极限指标, 此处风环境不至于产生不舒适。
7. 对测点 9, 在实际西北偏西风时风速为 5.03m/s, 应全年发生的频度为 8%, 此风向较接近规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生不舒适。。

8. 对测点 10, 在实际西北偏西风时风速为 4.89m/s, 应全年发生的频度为 8%, 此风向较接近规定的舒适极限指标, 预计在全年风向条件下, 将产生不舒适。

所以总体上: 该区在冬季盛行风向条件下有相当多的位置会出现风环境的不舒适, 应采取适当措施予以补救。

§ 4-7 恶劣风环境的预防及补救

恶劣的建筑风环境将给行人造成极不舒适, 这样会反过来影响建筑本身使用功能的发挥, 进而影响开发商的利益。创造舒适的建筑风环境非常重要, 而如何做到则需要一系列的步骤和办法。

1. 事前调查

首先, 在建筑建设前应对建筑物所在地点进行勘察, 以保证在建筑建设前对规划用地的风环境状况有明确的认识。这部分工作包括对规划用地本身风环境的调查以及规划地周围土地使用情况两方面。

1) 规划用地的风环境调查

- a. 调查该地区的常年主导风向等风气象情况。
- b. 在建设前是否已经有风环境问题的发生及发生的位置。
- c. 对于建设后引起的街谷和大楼风的可能性分析。

2) 周遍土地使用情况的确认

- a. 周围有无比较特殊的建筑一定要避免强风影响的。
- b. 周围有无行人与车辆特别密集的区域和街道。

2. 合理规划与设计

在掌握了规划用地的各方面资料后, 就可以进行针对风环境问题的合理设计和规划了。这方面的工作可以分为下面两个部分:

1) 防止大楼风的措施

- a. 通过设计缩小对主导风向的迎风面积。
- b. 通过改变边角呈光滑形或切角等措施减弱分离流的影响。
- c. 合理增大建筑物之间的距离, 防止穿堂风速急速增大

2) 防止风害的措施

- a. 通过防风隔板设置^{[46][47]}和合理布置绿化植栽, 以此减弱大楼风的影响。
- b. 对强风发生区域的建筑功能进行制约, 避免人群集聚。

3. 事后对策

对于已经形成的较差,甚至恶劣风环境除了以上的各项措施及时补救外,还要在一旦强风发生时准备好对策。如在某些区域设置风害警告牌或者对部分通道设置禁令等,从各方面避免风害事故的发生。

§ 4-8 本章小结

本章应用数值模拟和实测相结合的方法分析了浦东陆家嘴某楼群的风环境状况,数值模拟和实测基本吻合,并做了简单的评价,最后总结了一些恶劣风环境的预防及补救措施。

第五章 结论与展望

本文在总结前人对高层建筑群风环境问题研究的基础上,主要采用数值模拟的方法研究了高层建筑群的风环境,通过对 2×2 正交布置的不同横截面形状的高层建筑群的数值计算,主要取得了如下一些进展:

1. 45° 攻角的工况出现的风环境最大风速值一般比 0° 攻角工况要大
2. 0° 攻角工况最大风速往往出现在建筑物的穿堂区域,其次是迎风角区
3. 45° 攻角工况最大风速往往出现在建筑物的迎风角区,其次是穿堂区
4. 建筑间距与风速值成反比,这种工况在 45° 攻角工况和 0° 攻角工况都产生
5. 一个横风向宽度很大的高大建筑物,将造成强而阵性的“拐角风”,从而引起严重的“不安全”的风环境问题。对于本问数值模拟的长方体建筑物模型极值速比很大,可达到 2.85。此外,由于建筑物横风向宽度大,在建筑物的前方还会因空气的阻塞而出现一个风速的骤变区域,即造成“不舒适”的风环境问题。

本项目还对具体建筑风环境的预估、评价与预防体系做了一些总结,提出一套综合的办法,这将对有关建筑规划和风工程同行具有一定的参考应用价值。由于时间较短,缺乏系统全面的研究工作,对于一些更深入的问题还没有在本论文中完成。应进一步研究的问题主要有:

1. 不同相对高度建筑钝体群的风环境特性分析
2. 非正交布置建筑钝体群的风环境特性分析
3. 适合我国的风环境舒适评价准则的制订以及实际情况的风环境补救措施研究。

参考文献

- [1]. Penwarden,AD.,and Wise,A.F.E “Wind environment around buildings.”BRE REP.,*Building Research Establishment(BRE)* HMSO,London,England.(1975)
- [2]. Richard M.Aynsley. “Politics of Pedestrian Level Urban Wind Control. ” *Building and Environment*.v24.n4.pp290~295(1989)
- [3]. 丸田容藏 《高层建筑周边强风领域的相关研究》
- [4]. 孔珑编. 工程流体力学. 山东: 水利水电出版社. 1990
- [5]. W.D.Baines, “Effects of velocity distribution on wind loads and flow patterns on buildings,” *Symp of wind Effects on Buildings and Structures*,Paper6,London: H.M.S.O.,(1965)
- [6]. 相马清二、荒川秀俊、他三名, “霞关大厦周边风特性研究”, 1970, pp49~55
- [7]. A.F.E.Wise, “Effects due to groups of buildings,”*Phil. Trans.Roy.Sco. London A*.269, 1971,pp 469~485
- [8]. W.H.Melbourne and P.N.Joubert, “Problems of wind flow at the base of tall buildings,”*Proceedings of Intern.Conf.on Wind Effects on buildings and Structures* 1971, Tokyo,
- [9]. A.F.E.Wise and A.D.Penwarden, “Wind environment around large buildings,”*Symp.on External Flows,July.Paper J*.
- [10]. C.W.Hirt,J.D.Ramshaw. Numerical Simulation of Three-Dimensional Flow past Bluff Bodies.*Cumput.Methods Mech.Eng.*,14:93~142(1978)
- [11]. A.Baskaran,T.Stabopoulos.Computational of Wind Effects on Buildings. *Buildings and Eevironmrnt*,24:325~333(1989)
- [12]. D.A.Peterson,Computational of Wind Flows over Three-dimensional Buildings. *PhD Thesis,University of Queensland,Brisbane*,1986
- [13]. D.A.Paterson and C.J.Apelt,Computational of Wind Flows over Three-dimensional Buildings. *J.Wind Engng Ind.Aerodyn*,193~213,1986
- [14]. D.A.Paterson and C.J.Apelt,Simulation of Wind Flow around Three-dimensional Buildings. *Building and Environment*,VOL.24,1989[1]
- [15]. S.Murakami. A.Mochida. Three Dimensional Numerical of Airflow Around a Cubic Model By Means of Large Eddy Simulation. *J.Wind Engr.London.Aerodyn.*,25:291~305(1987)
- [16]. N.C.Markaton. The Mathematical Modelling of Turbulent Flows *J.Appl. Math. modeling*,10: 190~217(1986)
- [17]. T.Hanson, D.M. Summers. A Three Dimensional Simulation of Wind Flow around Buildings, *Int.J.Numerical Method.Fluids*,6:113~127(1986)
- [18]. D.M.Summers,T.Hanson. Vaslidation of A Computer Simulation of Wind Flow Over a Building Model, *J.Build.Eaviron.*,21:97~111(1986)
- [19]. D.A.Pateerson,C.J.Apeli.Simulation of Flow Past A Cube in A Turbulent Boundary Layer. *J.Wind Engr.Indua.Aerodyn.*,35:149~176(1990)
- [20]. Y.Li,T.Stathopoulos.Numerical Evaluation of Wind-induced Dispersion of Pollutants Around

- A Building. *J. Wind Engr. Indus. Aerodyn.*, 67 & 68, 757~766(1997)
- [21]. A.G.Robins, Plums Dispersion From Ground Level Source in Simulated Atmospheric Boundary Layer. *J. Atmos. Environ.* 12:1003~1044(1978)
- [22]. Penwarden A.D, "Acceptable Wind Speeds in Towns," *Build.Sci.* 8,3(Sept.1973),259~267
- [23]. Lawson T.V.and Penwarden A.D. "The Effects of Wind on People in the Vicinity of Buildings," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. London, 1975. Cambridge Univ.Press, Cambridge, U.K. 1976, pp605~622
- [24]. Poulton E.C., Hunt J.C.R., Mumford J.C., and Poulton J., "The Mechanical Disturbance Produced by Steady and Guety Winds of Moderate Strength: Skilled Performance and Semantic Assessments," *Ergonomics*, 18,6(1975),651~673
- [25]. Hunt J.C.R., Poulton E.C., and Mumford J.C., "The Effects of Wind on People :New Criteria Based of Wind Tunnel Experiments," *Build. Environ.*, 11(1976),15~28
- [26]. Isyumov N.and Davenport A.G., "The Ground Level Wind Environment inBuild-up Area," in *Proceeding of The Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. London, 1975. Cambridge Univ.Press, Cambridge, U.K. 1976, pp403~422
- [27]. Gandemer J., "Wind Environment Around Buildings:Aerodynamic Concepts," in *Proceeding of The Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. London, 1975. Cambridge Univ.Press, Cambridge, U.K. 1976, pp423~432
- [28]. Murakami S.and deguchi K, "New Criteria for Wind Effects on Pedestrians," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 7(1981), pp289~309
- [29]. Melbourne, W.H., "Criteria or Environmental Wind Conditions," *Jl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.3, pp241~249, 1978
- [30]. T.Stathopoulos, H. Wu and C.Bedard "Wind Environment Around Buildings:A Knowledge-based Approach," *J. Wind Engrg. and Indust. Aerodyn.* v41~44, pp2377~2388(1992)
- [31]. D.J.Wilson, "Airflow around Buildings," *Ashrae Handbook of Fundamentals*, 14.1~14.18 (1989)
- [32]. Theodore Stathopoulos, Hanqing Wu "Generic models for pedestrianlevel winds in built-up regions," *J. Wind Engrg. and Indust. Aerodyn.* v54/55, pp515~525(1995)
- [33]. E. Arens, D. Ballanti, C. Bennett, S. Guldman and B. White. "Developing the San Francisco wind ordinance and its guidelines for compliance." *Building and Environment*. v24, n4, pp297~303 (1989)
- [34]. T.V.Lawson. "The wind content of the built environment." *J. Ind. Aerodyn.* 3, pp93~105(1978)
- [35] 艾勇强 "高层建筑行人区风环境研究" 1992 年, 上海大学硕士学位论文
- [36]. A.P.To, K.M.Lam "Evaluation of Pedestrian-level wind environment around a row of tall buildings using a quartile-level wind speed descriptor" *J. Wind Engrg. and Indust. aerodyn.* v54/55, pp527~541(1995)
- [37]. H.G.C.Woo, J.A.Peterka and J.E.Cermak, Wind Tunnel Measurements in the Wakes of Structures. NASA-CR-2806, N77-19716, 1977

- [38]. J.A.Peterka and J.E.Cermak, Turbulence in Building Wakes *Proceedings of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. Cambridge University Press,1977
- [39]. 施宗城 “中性大气边界层模拟试验调试方法研究” 同济大学学报 v22,n4.(1994)
- [40]. Leison P. Abgasimmisionsblastungen durch den Krftfahr-seugverkehr. Koeln: Verlag Tuev Rheinland Ombh, 1978:243~248
- [41]. 华东师范大学地理系上海郊区粗糙度调查资料
- [42]. Frank H.Durgin “Proposed Guidelines for Pedestrian Level Wind Studies for Boston-Comparison of Results from 12 Studies.” *Building and Environment* v24, N4, PP305~402 (1989)
- [43]. N.C.Markatos. The Mathematical Modelling of Turbulent Flows, *J. Appl. Math. Modelling*,10:190~217(1986)
- [44]. B.E.Launder,D.B.Spalding. The Numerical Computation of Turbulent Flow, *J.Comp.Method in Appl.Math.Engr.*,3:269~289(1974)
- [45]. O'Hare M. and Kronauer R.E., “Fence Designs to Keep Wind from Being a Nuisance, ” *Archit.Rec.*pp151-156.(1969)
- [46]. Sharan V.K., “Wind Comfort and Wind Shelter,”in *Proceedings of the Symposoum on External Flows*,University of Bristol,(1972)
- [47]. Patankar, S.V. Spalding D.B. A Calculation Procedure for Heat and Momentum Transfer in Three- Dimensional Parabolic Flows, 1972, *Intern. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.15, pp. 1787-1806.

致谢

感谢导师王道增教授在硕士学习期间和论文完成过程中的悉心指导，以及对作者生活上的诸多照顾和关怀，在此论文完成之际，特别向王老师表示深深的谢意！

特别感谢刘宇陆教授在论文攻坚阶段给予的指导和鼓励。另外，感谢课题组宋付权副教授、罗柏华副教授等的指导和帮助。

感谢师兄樊靖郁、师姐张燕博士以及各位师弟师妹，在与他们度过的硕士学习期间使我受益匪浅。

最后，感谢远在家乡的父母，他们给了我足够的支持使我能顺利完成学业。