

城市高大建筑群周围风环境研究^{*}

刘辉志^{①**} 姜瑜君^② 梁 彬^③ 朱凤荣^③ 张伯寅^③ 桑建国^②

(① 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; ② 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100087; ③ 北京大学湍流和复杂系统国家重点实验室, 北京 100087)

摘要 城市中高大建筑物和建筑群会显著改变城市近地面层风场结构. 在有较强来流时, 建筑物周围某些地区会出现强风; 如果这些强风区出现在建筑物入口、通道、露台等行人频繁活动的区域, 则可能使行人感到不舒适、甚至产生伤害, 产生行人风环境问题. 因此在设计阶段, 应对建筑物的风环境做出评价, 以对可能出现的行人风场问题, 提出改进措施.

采用风洞热线测量、风洞刷蚀技术和计算流体力学数值模拟等方法, 对北京地区某高大建筑在北京地区盛行风条件下的风环境, 开展物理模拟和数值模拟, 并进行相互验证和比较. 研究结果表明, 3 种方法得出行人风场结构和分布基本一致. 研究还分析了各方法的长处和局限, 指出 3 种方法的相互配合, 可使城市高大建筑的行人风环境研究更为科学、合理.

关键词 城市高大建筑 风环境 风洞 数值模拟

随着社会、经济的高速发展, 城市的规模日益扩大, 城市中高大建筑的数量和高度也与日俱增. 这些建筑显著改变了城市的风环境. 一方面高大密集的建筑群, 降低了城市的通风、自净能力, 加剧了在低速条件下城市的空气污染和热岛效应; 而另一方面在风速较大时, 高大建筑周围会产生局地强风, 影响到行人的舒适与安全, 引出行人风环境(Pedestrian Level Wind Environment)问题^[1,2].

建筑物作为钝体出现在城市的近地面流场中, 由于下冲、狭管流、角流、穿堂风以及阻塞、尾流等

效应, 会使高楼建成后, 出现过去没有的局地强风现象; 局地强风的出现, 会造成行人活动困难, 以及建筑物的门窗和建筑外装饰物等破损、脱落、伤人等事故的发生. 这些问题在国内外都已经日益受到人们的重视. 许多发达国家也立法, 要求在建筑物的设计阶段, 给出建筑物建成后风环境的影响评价. 规划设计师、业主、开发商和建筑师也都希望, 他们提供的建筑有一个舒适安全的环境. 在此基础上, 高大建筑物(群)周围的风环境研究, 在最近几十年有很大的发展^[3~11].

2005-02-05 收稿, 2005-07-22 收修稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(编号: TG1999045700)、国家科学技术部国际科技合作重点项目(编号: 2004DFA06100)和国家自然科学基金项目(批准号: 40233030)资助

^{**} E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn.

风环境评价必须在建筑物设计阶段, 因此评价的依据只能根据设计方案。风环境研究所采取的方法, 通常是流体实验方法(风洞实验和水槽实验)和数值计算。在水槽实验中的激光质点测速法(PIV), 可得出建筑周边环境流场的定量数据, 并已应用在基础性的风环境研究中^[12,13], 但至今还没实现应用性评价。目前风洞中流场的速度测量仍是风环境研究中的主要实验方法; 但完成整个评价区域的测量, 是个很费时的工作。一些可替代逐点测量的方法(包括本研究中采用的风蚀法)也在试验中^[14,15], 以求一次性地得出评价区域的整体流动图像, 数值计算方法以简便易行方式得到三维空间流场、温度场和压力分布, 已广泛用于基础性和实用性风环境评价中。其中基础性研究包括利用实测和实验资料验证和进一步完善数值模式^[6,16,17]。例如, Jones等人^[18]利用香港高层居民楼风环境研究中的风洞测试资料和数值计算的结果比较, 发现用两种方法都可以预测出高层建筑附近风速增大3倍的强风区; 但是精细的位置和强风的范围, 两者仍有不一致之处。为了正确地应用数值模式, 进一步的研究和验证仍是必要的。

本文采用风洞模型实验、数值计算和常规气象资料分析, 对北京在朝阳区 S 大厦开展风环境研究; 其中风洞实验采用热线风速测量和风蚀技术两种方法, 和数值计算方法配合, 相互验证和补充, 为高大建筑物和建筑群的风环境研究, 提供了方便可靠的途径。

S 大厦设计方案中, 主体为 30 层的塔楼, 高 123 m; 其北侧有 5 层高的配楼, 其周边已有一定规模的原有建筑; 例如其西侧十余米处就有一已建好的会议厅。研究 S 大厦周围风环境的主要目标是在强风时, 例如北京地区冬、春季的强西北风, 塔楼周边以及其他建筑物之间的风场结构和分布特征。按原设计, 会议厅将被拆除, 因此对其周围风环境研究的另一目标是评估会议厅拆除前后, 风场有哪些改变。从风环境的角度, 对大厦的设计提出合理的建议; 最大限度的保证大厦建成后, 其周围会有比较舒适的风环境, 适合人们的出行和生活。本文将对 3 种评价方法的结果进行平行比较, 分析它们的可靠性, 及它们各自的优势和局限, 为建筑物和建筑群周围风环境的研究提供可靠而又准确的研究方法。

1 风洞热线测速得到的流场分布

1.1 实验设备及方法

风洞实验是在北京大学大气边界层风洞中进行的, 该风洞的规格为 32 m 长, 3 m 宽, 2 m 高。S 大厦和周围建筑物以 1:150 比例制成模型, 如图 1 所示。考虑大厦所在位置为北京市朝阳区, 其周围是城市建筑区, 风洞实验中, 来流条件假设风速在近地面层按幂指数定律分布, 设定为幂指数 $\alpha = 0.24$, 即

$$U(z) = U_r (z/z_r)^\alpha, \quad (1)$$

其中, z_r , U_r 分别为参考高度及该高度上的风速。

热线测速是风洞实验中的传统方法, 技术成熟。热线探头安装在 XYZ 三维移动的测量架上, 可自由移动到风洞实验段的任意测量部位。测量架上的标尺指示出该测点的三维空间(x, y, z)的坐标。图 2 为各测点的分布(相当于在实际大气中地面 4 m 高度处的风场)。布点的重点是测量西北风时可能出现的强风区, 特别是在塔楼的迎风面和背风面。为了研究会议厅拆除前后风场分布的变化, 在会议厅模型移走后, 做了相同来流条件下各点的风速测量。另外为了分析强风出现时风场的空间分布, 在塔楼东北角沿垂直线还测量了垂直各高度上的风速分布。

1.2 测量结果与分析

下面我们把分析的关注点放在塔楼南侧的强风区, 图 3 为各测点的风速值。最大风速出现在塔楼西南侧, 这是由于塔楼南端的角流以及塔楼和会议厅之间的狭管流共同造成的。取参数 R 表示强风区的强度,

$$R(x, y) = U(x, y)/U_0, \quad (2)$$

其中, U_0 为来流速度(地面 4 m 高度处), 本研究中取 $U_0 = 5.4$ m/s, $U(x, y)$ 为(x, y)点测到的风速值。R 又称风速加速因子, 表示强风区内风速增长的倍数。R 最大值出现在两建筑物之间的狭道上, 其最大值为 2.1, 表示强风区风速值已为来流的两倍。

图 4 为会议厅模型去掉后, 各测点测得风速值分布。会议厅拆除后, 消除了狭管效应; 但失去了会议厅对气流的阻挡之后, 角流作用的区域扩大了, 塔楼的南端都被强风区所覆盖, 其风速的加速倍数均在 2

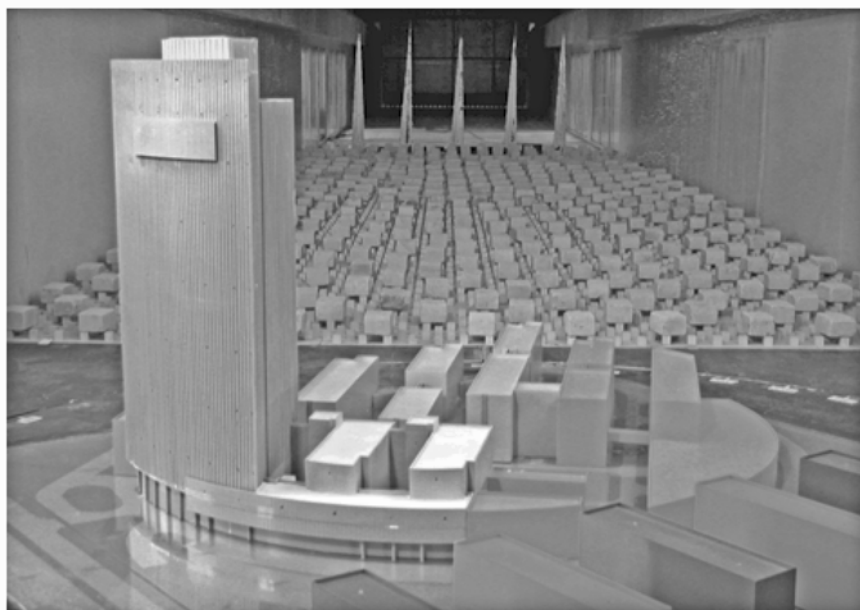


图 1 风洞中的 S 大厦及其周边已有建筑的模型(模型比例 1:150)
视线从西到东,图左端高层建筑为 Siemens 塔楼,图远端为风洞的锥形扰流板和粗糙元

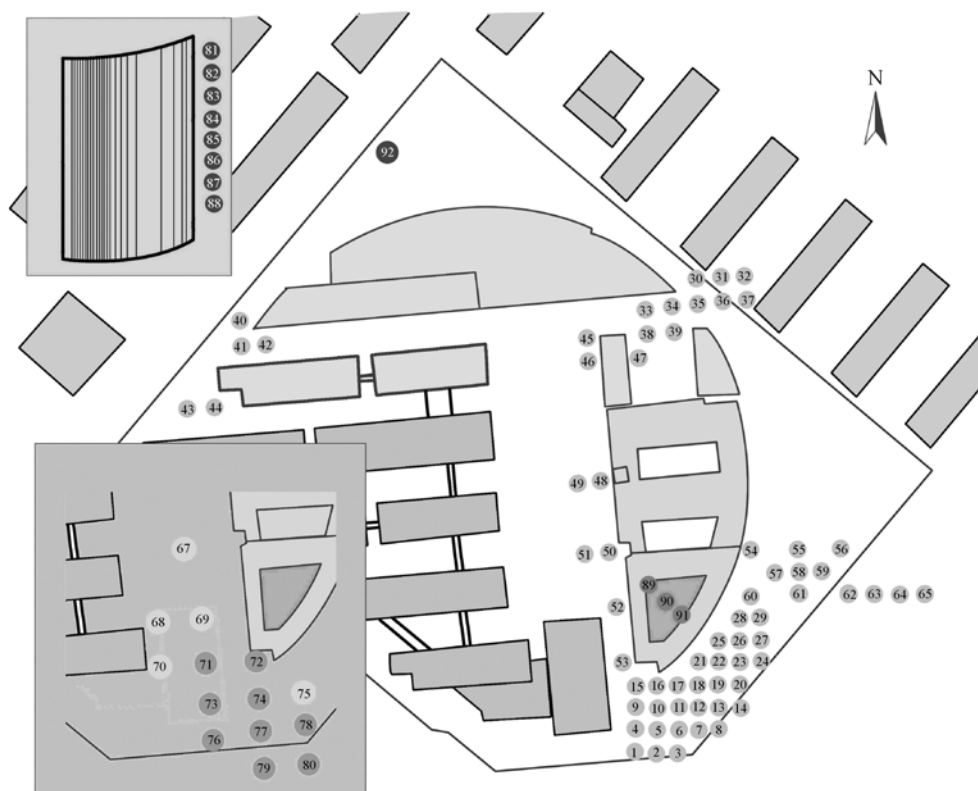


图 2 风洞热线测风的布点图
左上图为塔楼东北角,点(54)处垂直廓线上的测风点分布;左下图为会议厅模型移走后的布点图

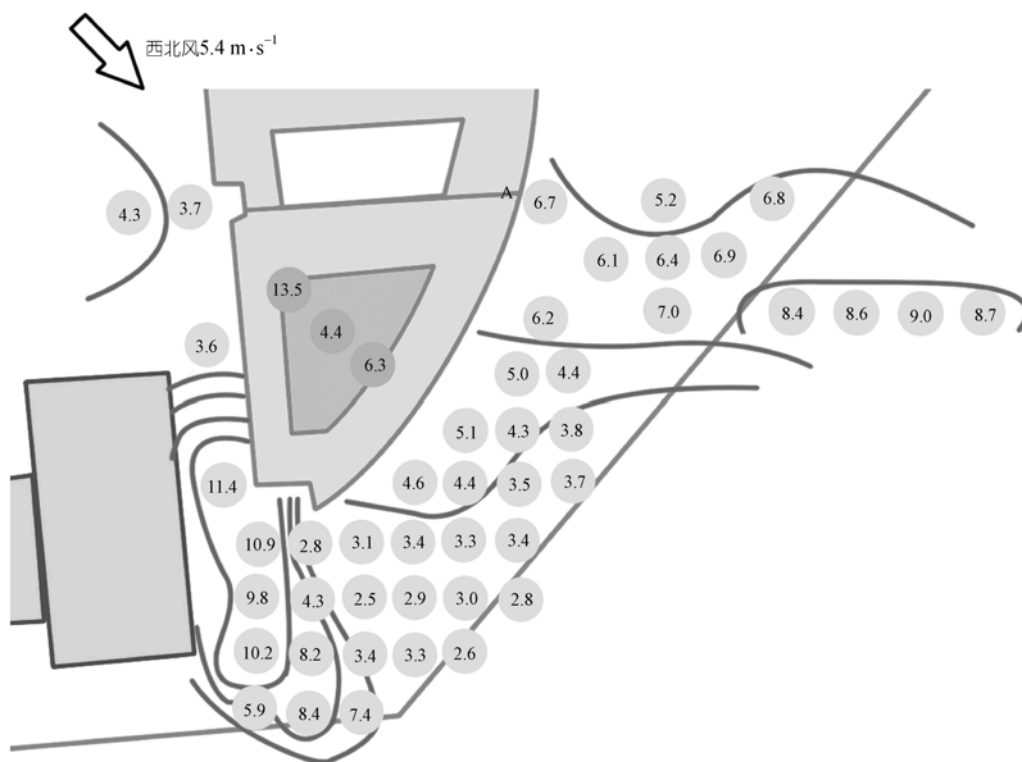
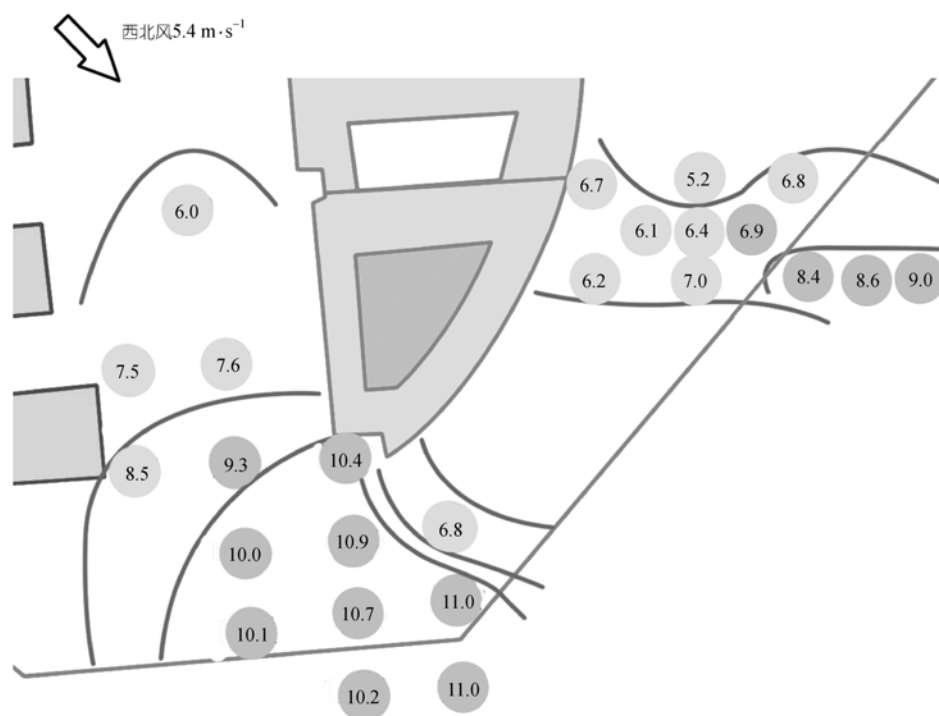
图 3 热线测量的近地面风速分布/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 测点高度为 2.67 cm, 相当实际大气中 4 m 高度, 来流速度为 $5.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 

图 4 与图 3 相同, 会议厅模型移走后的测量值分布

倍左右.

2 风洞实验中风蚀技术的应用

风洞实验中, 行人风场的测试技术可以分为两类: 一类是用测风仪器逐点的测量, 例如上节中采用的热线测速方法; 测速的仪器还可用热膜、压力探针、全向风速计等. 该方法要求要有足够数量和密度的测量点, 才能得到流场的全貌. 另一类方法是“面”的测量, 得出流场全貌的连续性的信息. 风蚀技术就是属于这一种^[14]. 它是在模型周围地板上均匀地撒上一层很薄的颗粒物, 让风将颗粒物吹动, 通过遗留下的颗粒物的图案, 显示出相对风速大小的分布.

本实验采用的颗粒物是麦糠皮, 呈片状, 粒径为 0.25~0.30 mm, 测试前将其烘干, 使其颗粒之间相互松散, 没有粘聚力. 当风洞风速逐渐提高到一定临界值时, 麦糠皮开始跳动, 此风速值称为临界起动风

速, 以 V_t 表示. 经过反复测试, 得到其平均值 $\bar{V}_t = 2.7$ m/s. 实验中将风洞的测试风速定为四档, 分别为

$$V_r/V_t = 0.55, 0.69, 0.76, 0.85.$$

第一档的来流风速应为 $V_r = 0.55V_t = 1.5$ m/s. 这个风速持续 2~3 min, 模型周边出现了刷蚀区, 表明该区域的风速已超过了临界起动风速(2.7 m/s). 该区域内风速与来流速度的比值, 为 $R = V_t/V_r = 1.82$ 倍. 通过对刷蚀区的拍照和图象分析, 就得出了 $R = 1.82$ 强风区络线. 依次提高风速, 重复上述的测量步骤, 可得到各档强风区, 即 $R = 1.82, 1.45, 1.32, 1.18$ 的包络线. 图 5 为西北风来流速度 $V_t/V_r = 0.85$ 的刷蚀图象, 强风区的位置与热线测量的结果一致. 图 6 为西北风各级强风区的包络线. 图 7 会议厅拆除后的强风区包络线. 比较图 6 和图 7, 可以发现会议厅拆除后, 强风区的区域扩大了, 强风的强度也有所增大.

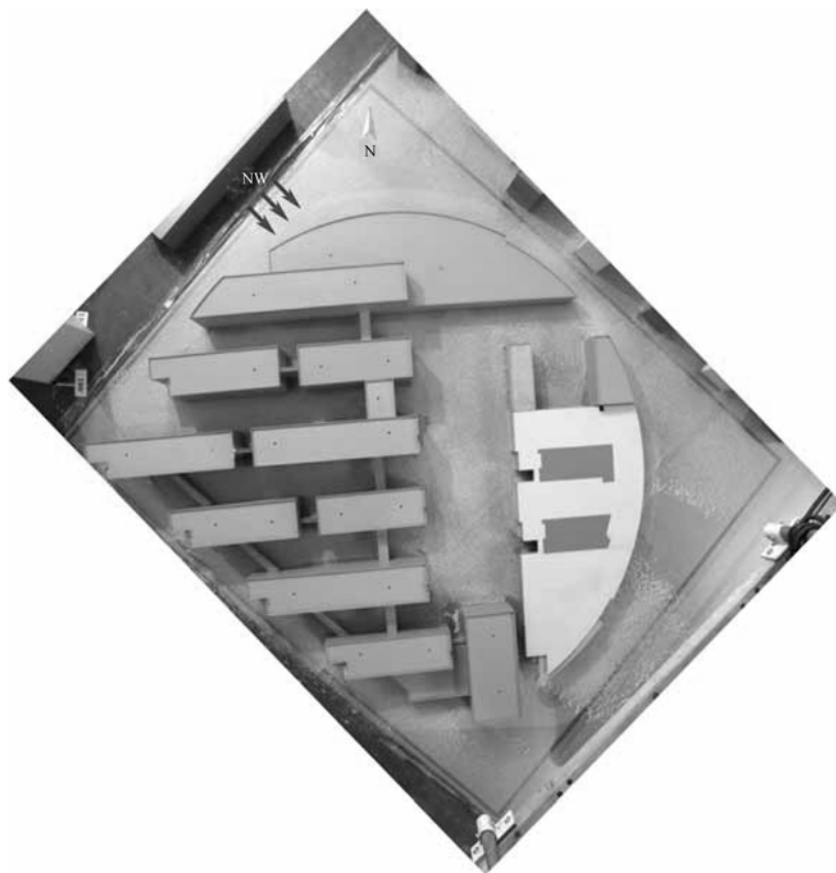


图 5 西北风第 4 档风速 $V_t/V_r = 0.85$ 的刷蚀图象
刷蚀区内风速加速值 $R \geq 1.18$

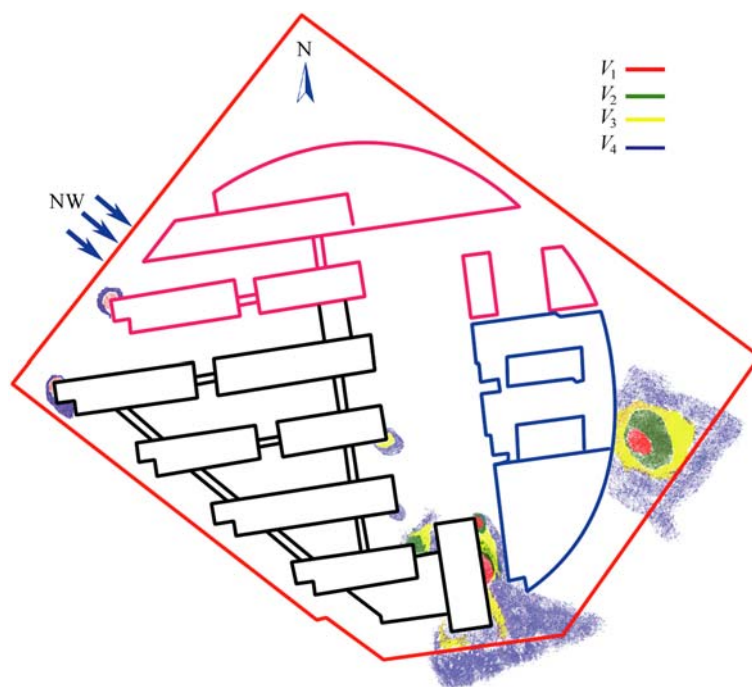


图 6 西北风时各档风速刷蚀区的包络线

各档来流速度分别为 $V_1 = 0.55V_b$, $V_2 = 0.69V_b$, $V_3 = 0.76V_b$, $V_4 = 0.85V_b$; 其中临界风速 $V_t = 2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 各刷蚀区内 R 值分别为 $R = 1.82, 1.45, 1.32$ 和 1.18

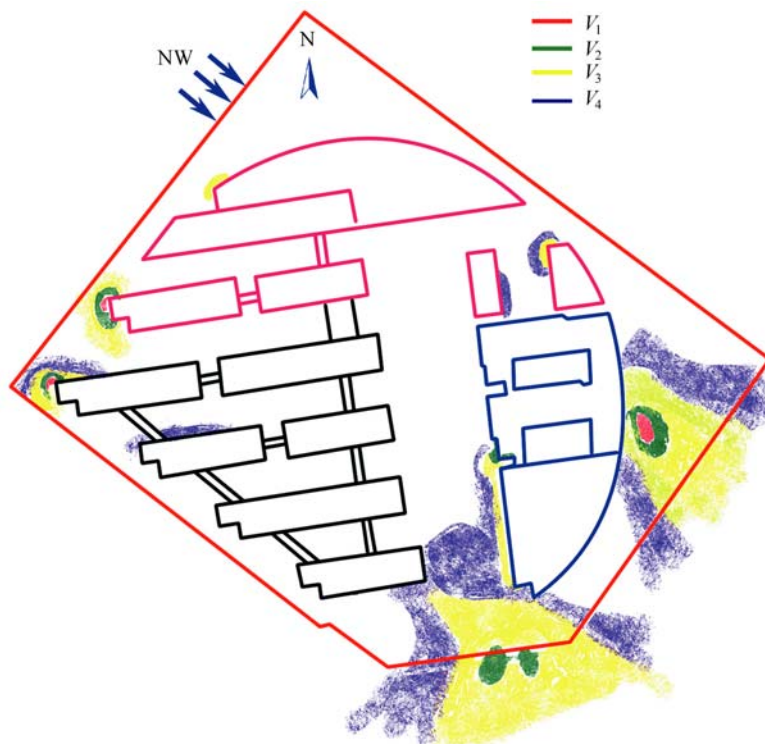


图 7 同图 6, 会议厅模型移走后的各档刷蚀区的包络线

3 流场的数值计算

数值计算是科学研究中的重要方法, 最近几十年来, 计算流体力学、计算风工程、城市气候模式等数值方法都有了长足的进展, 这使得城市中建筑物、建筑群、街道的流场计算有了坚实的基础. 本研究所以采用的流场模式是在上述基础上发展起来的, 其计算的准确性经过实测和风洞实验的验证^[19-23].

3.1 数值模式

在城市边界层的城市冠层中, 大气运动满足不可压缩假定, 并遵循雷诺平均运动方程, 其中的湍流项采用标准 $k-\varepsilon$ 模式闭合. 写成张量形式的连续方程和三维动量方程可表示为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (R_{ij}), \quad (4)$$

其中, u_i 为 x_i 方向上的平均风速分量 ($i = 1, 2, 3$). 当 $i = 1, 2, 3$, 分别表示速度在 X, Y, Z 方向上的分量. p 为扰动气压, 雷诺应力应为 $R_{ij} = \overline{u_i u_j}$. R_{ij} 是由于湍流运动而作用在空气块上的应力, 按湍流闭合假定:

$$R_{ij} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - 2 K S_{ij}, \quad (5)$$

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 可表示成为

$$K = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

其中, k 和 ε 分别为湍流动能和湍流动能耗散率, 通过下述方程得到

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - c_{\varepsilon 2} \varepsilon^2 / k, \quad (8)$$

根据前人的研究工作^[12], (6), (7), (8) 中的半经验系数取为

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

在湍流闭合方案中, 除了标准 $k-\varepsilon$ 方案, 在数值试验中还采用过, TKE 闭合和 RNG $k-\varepsilon$ 闭合方案. 试验表明, 采用 TKE 方案计算结果与风洞实验差别较大; 原因可能在于设定混合长只是地面高度的函数, 用于表达建筑物尾流部分的高湍流的混合长不甚合理. RNG $k-\varepsilon$ 方案和标准方案, 得到的计算流差别甚小, 用于行人高度风环境评价, 可以认为是等同的. 在下文中的讨论都是以标准 $k-\varepsilon$ 闭合方案的计算为依据. 在钝体绕流的计算中, 入流条件可取为定常的, 设平均风在近地面层仍按幂指数律分布, 幂指数 $\alpha = 0.24$, 即

$$U(z) = U_{10} (z/10)^\alpha, \quad (9)$$

其中, U_{10} 为地面 10 m 高度处的风速. 风向及风速的设定和风洞热线测风实验的来流条件完全一致.

本计算采用正交等距网格. 根据建筑物的设计图, 在模式中确定出建筑物的各几何表面, 按钝体表面处理. 在出流边界, 取自由流边条件. 在钝体表面如墙面、路面、屋顶, 取非滑动边条件, 即

$$u = 0.0, v = 0.0, \frac{\partial k}{\partial n} = 0.0,$$

其中, n 为固壁的法线方向. 初始风场设成和入流边条件(9)式一致, 在有建筑物占据的网格上, 取风速为零.

3.2 数值模式计算结果

数值模式计算的来流条件选择北京朝阳地区盛行风西北风和西南风两种情形; 前者多出现在冬、春季, 后者多出现在夏季. 下面我们只讨论西北大风时的情况. 数值模式模拟的区域分为两种. 计算域 A 为 360 m × 320 m, 格距 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 4$ m, 其范围包括了拟建的 S 大厦, 以及原有的周边建筑. 计算域 B 为 150 m × 210 m, 格距 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2$ m, 其范围只包括塔楼和邻近的会议厅.

图 8 为西北风计算域 A 中 4 m 高度处的水平流场. 从图中可以看出, S 塔楼周边强风区有两个, 一是在塔楼东侧, 是由塔楼东北角的角流造成的; 此处

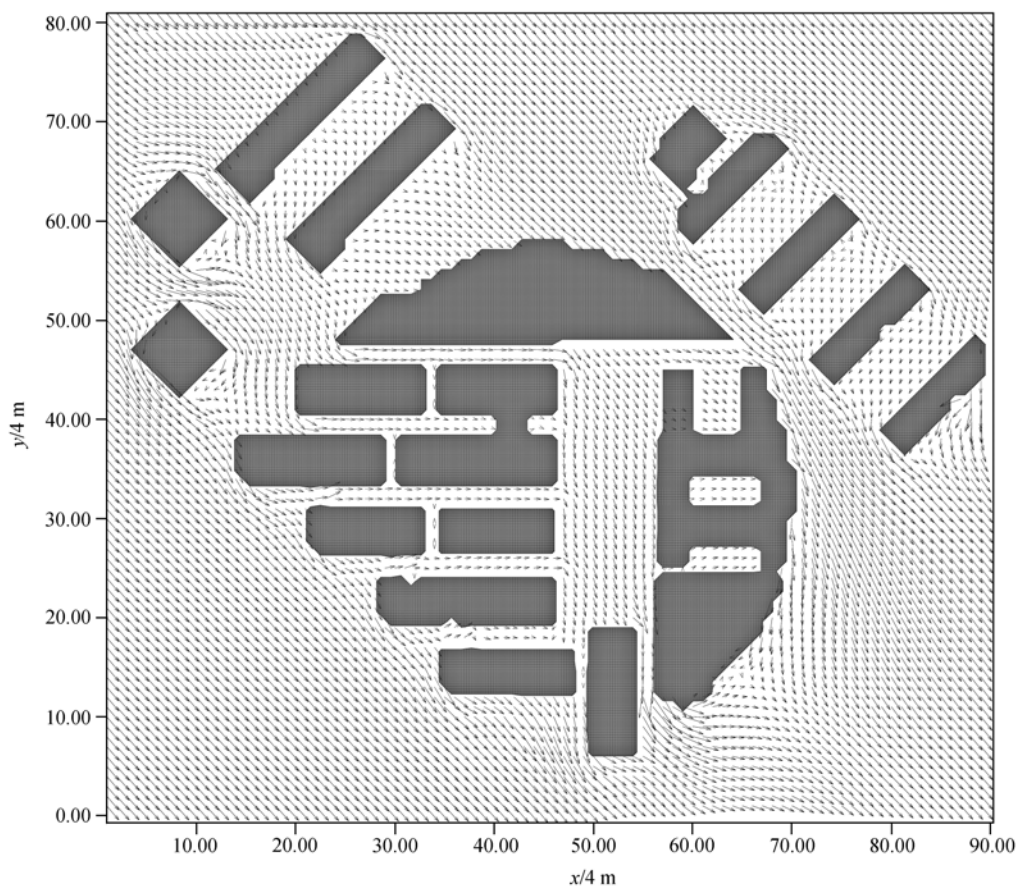


图8 西北风计算域 A 中 4 m 高的水平流场矢量图
坐标数字为格点数, 格点距为 4 m

设计为绿地, 因此强风不会对行人产生大的影响. 另一处强风区在塔楼南侧, 它是由塔楼南角的角流, 以及塔楼、会议厅之间的狭管风共同形成的. 塔楼南端是其主要出入口, 强风必然对来往行人活动造成诸多不便. 因此此处强风区的形成及与周围建筑的关系将是本文讨论的重点.

图 9 为计算域 B 得出的结果, 其分辨率较高, 以便更加仔细地讨论流场的结构. 取 $R(x, y) = U(x, y, h)/U_0$, 其中 $U(x, y, h)$ 为格点 (x, y) 高度 $h = 4$ m 处的风速值大小, $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$, U_0 为高度 $h = 4$ m 处的来流速度. 图 10 为西北风计算域 B 中 R 值的分布. 图中表明, R 最大值为 1.8—2.0; 最大 R 值出现在塔楼和会议厅之间的狭长的通道中, 较大 R 值向南伸展到塔楼南端的出入口附近. 图 11 为会议厅拆除后, R 值的分布.

在图 9、图 10 中塔楼南侧的强风区主要是由于产生于塔楼的角流而引起的. 塔楼迎风面(西侧面)的正压与背风面的负压之间存在巨大的压力差, 由此引发的强气压梯度力, 会使气流加速流动. 当有会议厅阻挡时, 降低了迎风面气流的强度, 也降低了压差和气压梯度力, 对角流有减缓作用. 而当去掉了会议厅的阻挡后, 角流更为强劲, 其控制区扩大南移, 使得图 11 的 R 高值区比图 10 的范围更大; 从而影响了该区的行人风环境, 导致行人行动的不舒适.

4 讨论与总结

4.1 行人风场评价

上述 3 种行人风场的研究方法都表明, 由于高大塔楼及其附近建筑的共同影响, 在塔楼西南侧出现

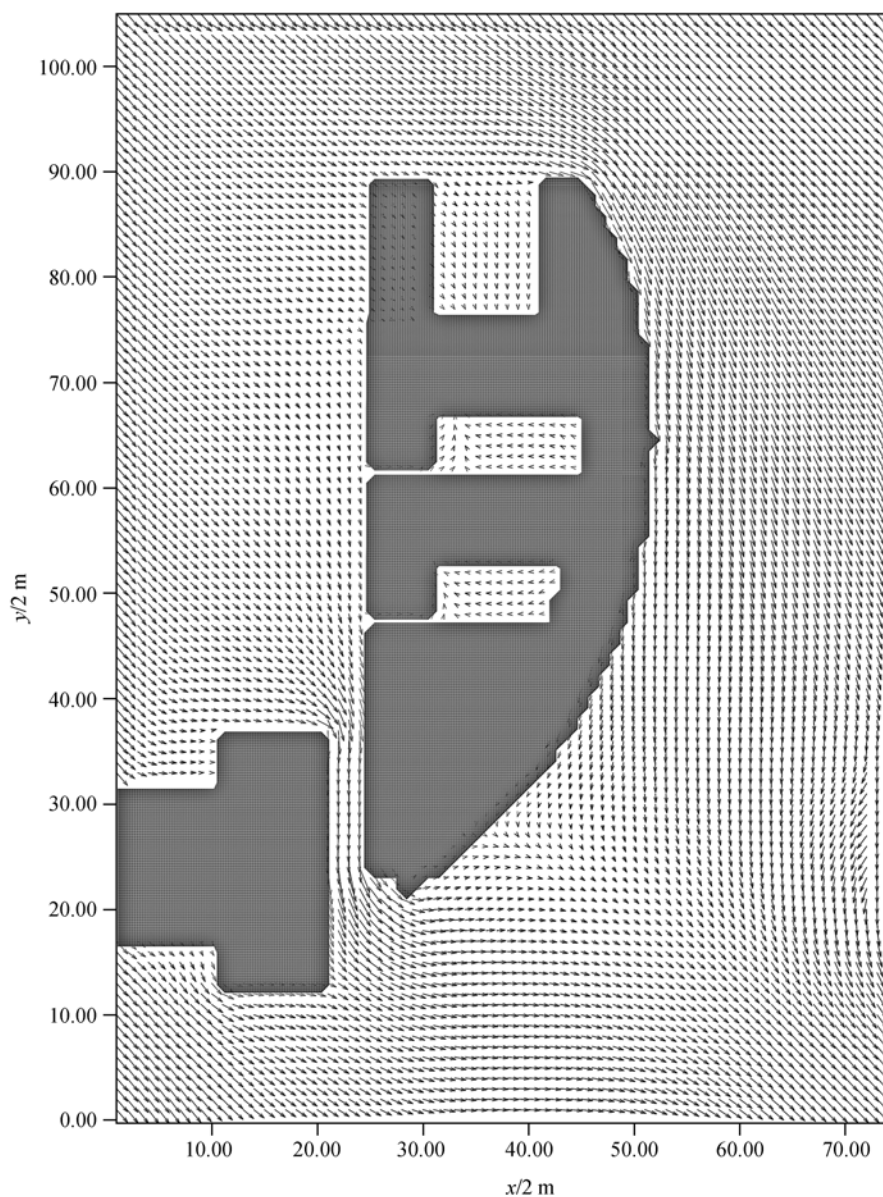


图9 西北风计算域 B 中的近地面的水平风分布
格点距为 2 m

强风区, 强风区的风速与来流速度的比值 R 已超过 1.8; 这意味如果来流西北风速为 10 m/s(6 级风), 则此强风区风的风速可超过 18 m/s(8 级风). 在给定风向上风速超过某一规定值 V_0 的发生概率 p , 可用两参数的威伯尔(Weibull)分布函数表示:

$$p(V > V_0) = \beta \exp[-(V_0/C)^\gamma], \quad (10)$$

其中, β 为该风向的风频, 参数 C 和 γ 可根据当地常规

气象站的地面风资料统计得出. 在北京朝阳区西北风方向上(根据气象站历史资料统计得到), 上述值分别为

$$\beta = 10.88\%, C = 4.06 \text{ m/s}, \gamma = 1.19.$$

S 大厦地区西北风风速超过 10 m/s 的概率为

$$p(V > 10 \text{ m/s}) = 0.006,$$

在一年中出现的小时数应为 $0.006 \times 365 \times 24(\text{h}) = 52 \text{ h}$.

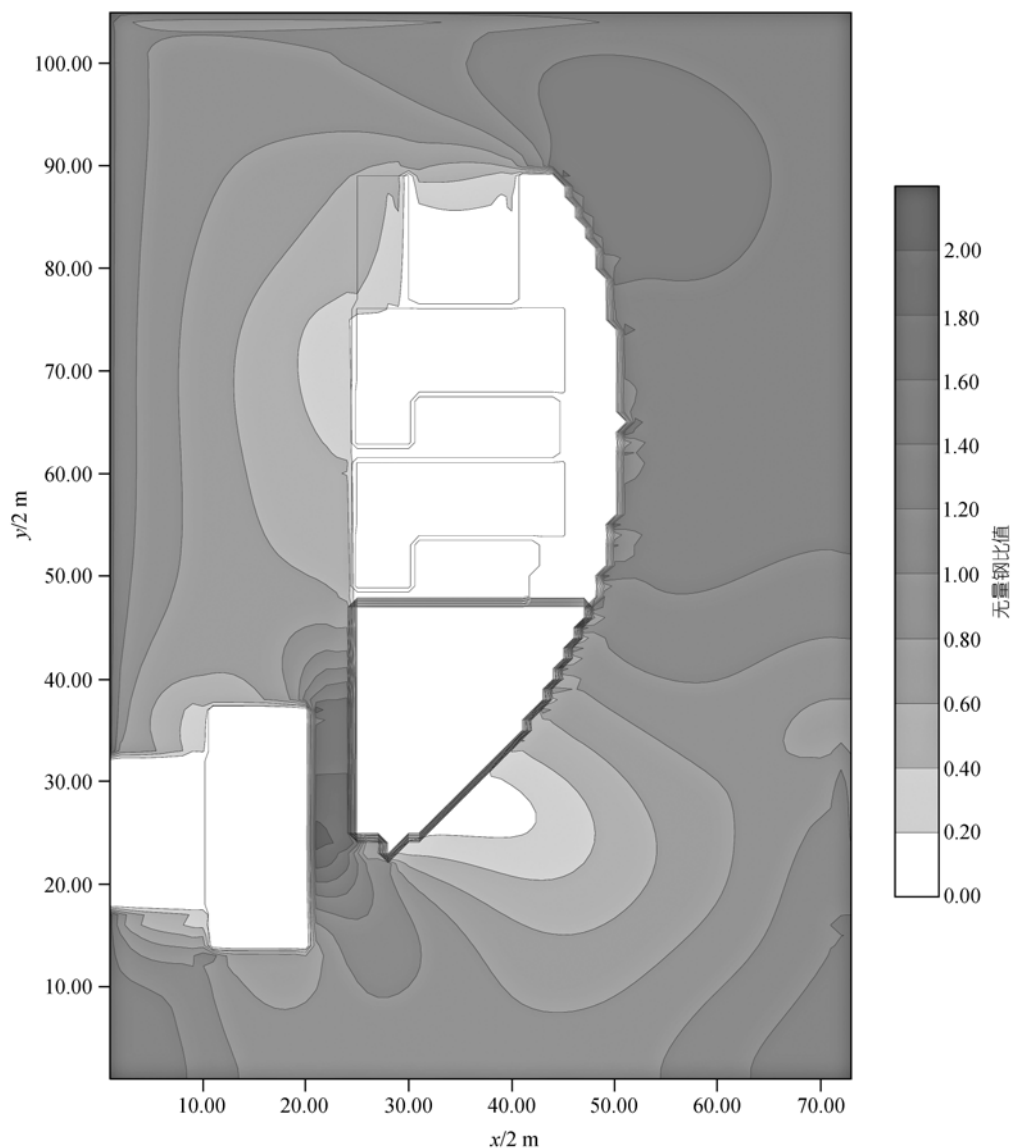


图 10 西北风计算域 B 中的 R 值分布
格点距离为 2 m

按行人风场评价标准^[2], 一次大风事件持续 1.7~2.5 h; 如按 2 h 计, 则上述大风出现次数为 26 次。这就意味一年中, 在此强风区内出现 8 级大风的可能次数为 26 次。按行人风场的评价标准^[2], 如果一年中 8 级大风出现的次数超过 1 次, 则认为对于行人的活动是“不舒适”, 甚至是“不安全”的。在北京地区冬、春季出现 6 级西北风的概率是较高的, 这就意味 S 大厦按现有设计, 在其南侧出入通道附近出现 8 级大风的机会必

定很多, 这是不可接受的。特别是拆掉了会议厅后, 情形会更为严重。

为避免大厦建成后, 出现不良风环境问题, 应在设计和施工阶段采取适当措施; 例如改变出入口和行人通道的位置和朝向, 以避开强风区; 保留会议厅, 以避免强风区扩大; 在强风区即塔楼两侧、会议厅以北, 开辟树冠浓密的绿化带; 在出入口和人行道的上风向设置防风屏障等。这样可以在大厦建成后,

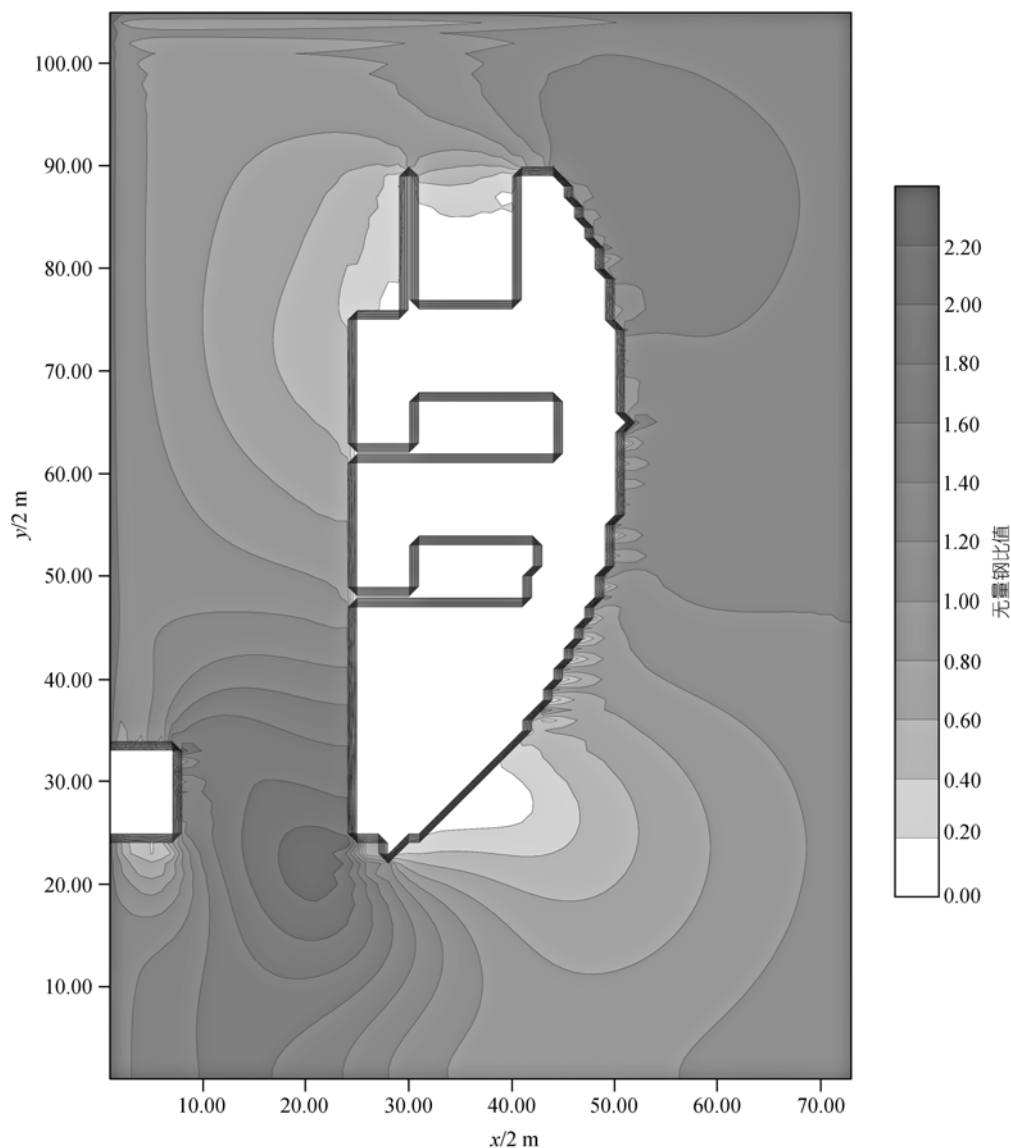


图 11 西北风计算域 B 中, 拆除会议厅后, R 值分布
格点距离为 2 m

创造一个舒适、和谐、健康的开放空间, 以利行人在此区域的日常活动。

4.2 3 种评价方法的比较

从以上的结果看, 3 种方法都预测出行人风场强风区的位置和强度。强风区风速比值 R 都在 1.8~2.2 之间。 R 高值的位置和范围都大致重合, 因此其中每种方法都可独立地使用, 给出行人风场合理的评价。

然而由于 3 种方法的原理和技术手段不同, 它们测出的地面风速场不可能完全一致。例如刷蚀方法得出的速度值分布是根据刷蚀图象。颗粒物的刷蚀过程决定于风速、气流吹蚀的时间长短, 还决定于颗粒物粘聚力的大小; 而颗粒物粘聚力还决定于麦糠的和烘干程度, 因而也受实验时空气湿度的影响。在数值计算方法中, 差分格式、湍流闭合方案、边条件设置的不同, 都会造成计算结果的细微差别。

3 种方法也各有长处和局限, 风蚀方法适用于较大规模建筑群的风环境评价. 例如它可以给成片的商业区内强风位置、范围和强度的连续性分布, 有助于商业区的整体规划; 但其只能提供近地面风场状态. 热线风速流量可以得出行人风场风速分布, 还可得到空间任意点, 例如屋顶、露台的风速分布. 但对于大范围的测量, 其工作量很大, 如果测点间距不够密, 可能会漏掉强风范围和风速极大值. 因此多种方法配合使用, 会得到更好的效果. 例如先采用数值模拟和风蚀技术, 得出强风的分布; 再用热线在强风区做加密的测量, 包括强风区垂直方向上的测量, 这样可以得到风场的细微结构. 也有助于更好地理解强风的成因, 并采取有效改善风环境的措施.

4.3 空间流场的比较

数值计算和热线测量都可得出空间流场分布; 而刷蚀方法只能给出近地面的风速的水平分布, 无法给出流场的空间分布. 图 12 给出了在西北风来流条件下, 塔楼东北角水平风速 $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 的垂直廓线的测量值和计算值的比较. 此图反映了由于塔楼存在而造成的角流结构. 由图可以发现, 角流影响流场的区域高度在塔楼的高度以下; 超过塔楼的高度, 角流消失.

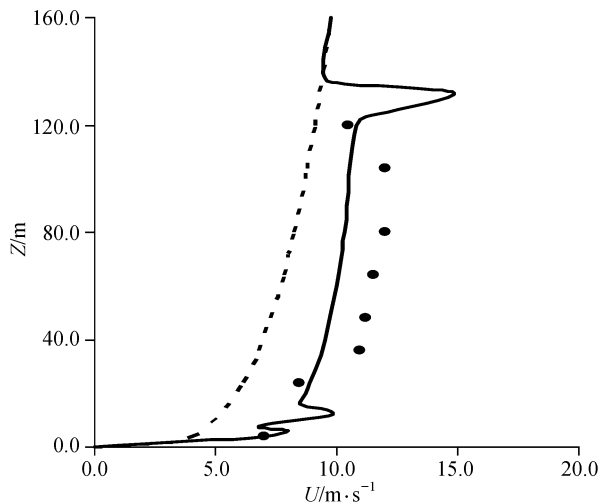


图 12 西北风塔楼东北角水平的风廓线
虚线为来流廓线, 实线为计算值, 园点为热线测量值

4.4 结论

本文采用数值计算、风洞热线测速和风洞刷蚀技术, 对同一座拟建的大厦周围的风环境进行详细的研究, 以求建筑风环境评价的最优方法. 结果表明, 3 种方法对风环境评价的结论是一致的. 研究还表明, 3 种方法各有特点. 风蚀技术可用于单体高大建筑的风环境评价, 而对大规模建筑群的评价更显出其优越之处, 它可提供出大面积区域风环境的全貌. 风洞热线测量可得出整个评价区的风环境, 并可针对重点关注地区, 如行人活动频繁的开放空间、可能出现强风的区域等, 进行加密的测量; 同时还可以对建筑物周边三维空间风场进行测量, 以便得出强风区的结构和形成机制. 数值方法更为方便灵活, 可以通过不同分辨率的网格, 得出不同尺度域的风场的水平及空间结构; 更进一步可采用变网格或套网格方式, 使风环境评价区域从大到小, 从粗到细, 从宏观尺度进入微尺度.

通过 3 种方法的比较和相互验证, 表明此数值模式计算结果的可靠性. 数值试验还表明, 采用标准 $k-\epsilon$ 方案, 可以很好解决城市风环境计算的湍流闭合问题, 在今后城市化高速发展中, 数值计算可能成为在风环境评价中一种可独立使用的可靠评价方法.

综上所述, 各方法单独使用就可得出合理的评估结论. 两种以上方法配合使用, 将使风环境评价, 更为科学、准确、合理, 也会使评价工作更为有效, 为高大建筑物周围风环境的改善提供科学的依据; 从而为行人创造更加舒适的活动空间. 这将是城市化进程高速发展情况下, 如何改善城市居住环境质量的一个重要课题. 尤其对于我们发展中的大国, 城市人口高度密集, 城市高大建筑也高度密集. 城市高大建筑周围风环境的研究在今后几十年将会日益得到人们的关注, 也将成为城市气候学研究的重点.

参 考 文 献

- 1 Isyumov N. A Study of the pedestrian level Winds for the Canary Wharf Project. London, England: Engineering Science Research Report, BLWT-SS16, 1986. 23~34
- 2 Bottema M. A method for optimization of wind discomfort criteria. Build Environ, 2000, 35: 1~18[DOI]

- 3 Capelato I G, Yezioro A, Shariv E. Climatic aspects in urban design—a case study. *Build Environ*, 2003, 38: 827~835
- 4 Chang C H, Meroney R N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyon. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2001, 89: 1325~1334[DOI]
- 5 Ferreira A D, Sousa A C, Viegas D X. Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2002, 90: 305~319[DOI]
- 6 He J, Song C S. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1999, 81: 295~309[DOI]
- 7 Williams C J, Soligo M J. A discussion of the components for a comprehensive pedestrian level comfort criteria. Landon: Eight International conference on wind engineering, 1991. 45~56
- 8 American National Standard A58. 1-1982. Minimum design codes for buildings and other structures. New York: ANSI, Inc, 1982. 82~94
- 9 Hunt J C R, Poulton E C, Mumford J C. The effects of wind on people; new criteria base on wind tunnel experiments. *Build Environ*. 1976, 11: 15~28
- 10 Penwarden A D, Wise A F E. Wind environment around buildings. Building Research Establishment Report, HMSO, 1975
- 11 Cochran L S, Cermak J E. Full and model-scale cladding pressure on the Texas tech experiments building. *Wind Engineering, Proc 8th Int Conf*, London, Canada, 1991. 19~31
- 12 Liu H Z, Liang B, Zhu F R. A laboratory model for the flow in urban street canyon induced by bottom heating. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 554~564
- 13 Baik J J, Park R S. A laboratory model of urban street canyon flows. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 1592~1600[DOI]
- 14 Livesey F, Incullet D, Isyumov N, et al. A scour technique for evaluation of pedestrian winds. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1990, 36: 779~789
- 15 Buckisch R, Brechling J, Koeltzsch K. Qualitative wind comfort measurement by using infrared thermograph. *Biometeorology and urban climatology at the turn of the Millennium*, 2002. WMO/TD-No, 1026, 77~88
- 16 Sang J G, Liu H P, Liu H Z. observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2000, 87: 243~258[DOI]
- 17 Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *J Sci Comput*, 1986, 1: 1~51[DOI]
- 18 Jones P T, Alexander D, Burnett J. Pedestrian wind environment around high-rise residential buildings in HongKong. *Indoor and Building, Environment*, 2004, 13: 259~269[DOI]
- 19 Liu H Z, Sang J G, Zhang B Y, et al. Influence of structures on urban ventilation: a numerical experiment. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(6): 1045~1054
- 20 桑建国, 刘辉志, 王宝民. 街谷流场和热力环流的数值模拟. *应用气象学报*, 2002, 13: 69~81
- 21 王宝民, 刘辉志, 桑建国. 大风条件下城市冠层流场模拟. *大气科学*, 2003, 27: 255~264
- 22 王宝民, 孙向明, 刘辉志, 等. 二维城市街谷热力场数值模拟. *北京大学学报*, 2004, 40: 774~780
- 23 Jones A C, Launder D B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. London: Academic Press, 1972. 1~358