

基于多尺度耦合的城市小区风环境大涡模拟研究

沈 炼^{1,2}, 邓万钊¹, 唐春朝³, 陈 幼¹, 韦成龙¹

(1. 长沙学院 土木工程学院, 湖南 长沙 410022; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘 要: 随着生活水平的不断提高, 人们对小区的居住舒适度有了更高的要求, 然而风环境作为城市舒适度的重要评价指标, 目前对其研究还存在明显的不足. 为揭示城市小区风场的详细分布规律, 本文以长沙梅溪湖国际新城为研究对象, 利用 WRF 与 CFD 软件多尺度耦合的手段, 对不同来流作用下梅溪湖小区风环境进行了数值模拟, 实现了城市小区风场数值模拟入口边界条件的精细化研究. 研究表明: 地表粗糙度是引起局部风场复杂多样的主要原因; 小区风场受局部地貌的影响较大, 在建筑群的背风侧风速较低, 迎风侧风速较大; 不同风向角条件下, 风速大小受地形影响较大, 且在超高建筑群附近, 风速容易发生加速效应.

关键词: 风工程; 城市风环境; 大涡模拟; 多尺度耦合; 入口边界

中图分类号: TU984.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-5298(2019)03-0037-07

Large Eddy Simulation of Urban Wind Environment Based on Multi-scale Coupling Method

SHEN Lian^{1,2}, DENG Wanchao¹, TANG Chunchao³, CHEN You¹, WEI Chenglong¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Urban wind environment is playing an important role in urban resident daily life. However, the numerical simulation research on real residential areas is still very lacking. This paper takes the Meixi Lake community as the research background, and the multi-scale coupling method of weather research forecasting (WRF) and calculation fluid dynamics (CFD) was applied to the analysis of the pedestrian wind environment. Then, the refined boundary conditions for numerical simulation of wind field in urban communities were realized. Meanwhile, in order to obtain the wind field distribution inside the community, the detail numerical simulation of wind environment for Meixi lake with different wind directions were conducted. Results show that the surface roughness would lead a complex and diverse local wind environment. The wind speed is relatively large at the building group windward side, while it is relatively small at the leeward side. Under different wind angles, the wind speed is greatly affected by the terrain, and the accelerate effect may be occurred near the super tall buildings.

Key words: wind engineering; urban wind environment; large eddy simulation; multiscale coupling; inlet boundary

在城市地区, 人行高度风环境的优劣关乎小区居民生活品质的好坏. 随着城市建筑高度与密度的不断增加, 城市小区内部风环境愈加复杂, 因高耸建筑物排列不当引发的风环境问题屡见不鲜^[1, 2]. 但目前对其研究的深度与广度还远远不够, 特别是利用数值模拟对实际居民小区风环境的研究还非常缺乏, 其主要原因是入口边界条件的给定问题还没有完全解决. 利用数值模拟对复杂风场进行研究, 几何模型不可能无穷大, 因此地形模型在截断位置会存在高程差, 简称为“人为峭壁”. 这种高程差会导致入口来流在截断位置出现流场分离或绕流现象^[3]. 最初, 研究者^[4]没有考虑该问题, 将整场平均风速剖面赋给数值模拟的入口边界. 后来, 基于指数率与对数律风剖面的赋值方法成为了处理入口边界问题的主流手段^[5-7]. 为解决“人为峭壁”问题, 许多学者采用气流过渡段对入口位置进行处理, 如陈政清^[8]、胡峰强^[9]等分别采用渐变补偿段对风洞试验的“人为峭壁”进行了处理; Maurizi等^[10]也采用1/10的斜坡过渡, 对14km×15km区域范围的山区地形进行了数值模拟, 但模拟过程中斜坡形式较为简单, 其适用性有待验证; 胡朋^[11]等则用曲线

收稿日期: 2019-03-23

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目(201811077003); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50688); 长沙市科技局项目(kc1809017)

作者简介: 沈 炼(1988-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 讲师. 主要研究方向: 风工程

过渡段对山区峡谷边界进行了处理,但这种处理会引起人为来流风攻角.通过长时间的探索,入口问题一直没有得到完全解决.近年来,随着气象预报模式的快速发展,中尺度模式与CFD软件耦合方法得到了广泛应用.其主要思想是将中尺度大气模式计算结果作为微尺度计算域的侧向边界条件,通过这种方式获得的入口平均风速相比以往凭经验给定的平均风速其合理性与科学性得到明显提升.国内外不少学者对WRF与CFD软件的耦合模式进行了探索^[12~14],如Baik^[15]等用RANS模型与中尺度模式进行了耦合,研究了首尔的大气流动和污染物扩散;刘玉石^[16]等用WRF与LES耦合的方法对北京某小区交通污染进行了多尺度分析;Xie^[17]指出了LES和中尺度气象模式耦合是城市小区数值模拟发展的方向.经过数年的发展,WRF已经成功运用在风能资源分析、城市小区污染扩散、物理参数化方案等领域^[18],但对于城市小区局部风环境的研究目前还较为少见.因此,本文以长沙梅溪湖国际新城为研究对象,利用多尺度耦合的方法将中尺度气象模式WRF与CFD软件进行对接,并将CFD大区域与小区域模型进行进一步耦合,实现了城市小区风场数值模拟入口边界条件的精细化研究.然后对不同来流作用下的梅溪湖小区风环境进行详细模拟,得到了小区内部风场的分布规律.

1 数值模型和理论方法

1.1 中尺度模式

中尺度模式(WRF)是美国国家大气研究中心(NCAR)、国家环境预报中心(NCEP)及多个大学、研究机构共同研发的新一代中尺度数值模式系统,是一个统一的“共用体模式”.WRF 模式设计理念先进,采用Fortran 90 语言进行编写,其特点是灵活、可扩展、易维护和使用平台广泛.WRF 模式由于可以模拟中尺度大气的风场、温度场、湿度场和压力场,近年来得到了广泛应用.其主要包含两个动力框架,分别为WRF-ARW 模式和 WRF-NMM 模式,本文采用 ARW 模式来获取 CFD 模式的侧向入口边界^[19].

1.2 大涡模拟

LES 是一种发展非常迅速的湍流模型,最早由大气科学家 Deardoff^[20]将其运用在工程领域,其思想是通过滤波函数把每个变量分解成可解尺度 $\bar{\phi}$ 和不可解尺度 ϕ' 两部分.可解尺度 $\bar{\phi}$ 可表示为

$$\bar{\phi} = \int_D \phi' G(x, x') dx'. \quad (1)$$

其中 D 为流动区域, x' 为实际流动区域里面的空间坐标, x 是过滤后的大尺度空间坐标, $G(x, x')$ 是过滤函数,表达式为

$$G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{V}, & x \in v, \\ 0, & x \notin v. \end{cases} \quad (2)$$

这里 V 是控制体积所占几何空间的大小.过滤后瞬态下的空间 N-S 方程可表示为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \right]. \quad (4)$$

式(3)和式(4)分别为动量守恒方程和质量守恒方程,其中带横线上标的量表示过滤后的可解尺度量, u 为速度, p 为压力, τ_{ij} 为亚格子尺度应力.

2 基于多尺度耦合的城市小区风环境入口边界条件研究

2.1 WRF 计算域选取与参数设置

本文平均风速利用中尺度气象模式 WRF 提取,以梅溪湖国际新城为研究对象,模拟中心为(112.89E, 28.19N),水平方向采用五重嵌套网格,如图 1 所示.

模拟过程中, 计算域网格尺寸布置见表 1. 最外层网格水平距离为 2025km, 最内层网格水平距离为 50km, 计算域大小如图2所示. 垂直方向设置50层, 其中1km以下布置13层, 第一层网格高度为25m, 初始场选用2015年10月25日12:00时的NCEP1°×1°再分析资料, 积分时间采用24h, 边界条件每6h更新一次, 每15min输出一次模拟结果. 在分析诊断时不考虑云和降水过程的影响, 地形资料采用NCEP提供的全球30s地形数据及MODIS下垫面分类资料.

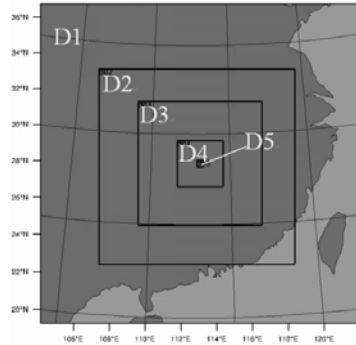


图1 WRF 计算域



图2 计算中心

表1 五层网格嵌套信息

区域	网格数	网格格距(km)	区域尺寸(km)	时间步(s)	层数
1	50×50	40.5	2025×2025	243	50
2	91×91	13.5	1228.5×1228.5	81	50
3	161×161	4.5	724.5×724.5	27	50
4	181×181	1.5	271.5×271.5	9	50
5	101×101	0.5	50×50	3	50

2.2 基于多尺度耦合的边界条件精细化分析

数值模拟过程中, 首先对 WRF 中 CFD 入口所在位置的风速进行监测, 得到 CFD 入口位置风场的空间分布. 由于 WRF 是中尺度模式, CFD 为微尺度模式, 二者在交界面的网格分辨率不在一个量级. 如本文 WRF 的最底层网格高度为 25m, 如何得到 CFD 近地面 25m 内的风速信息是高精度数值模拟的关键. 我们利用对数律风剖面对该区域风场进行描述, 可表示为

$$u = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right). \quad (5)$$

其中 u 为 z 高度位置平均风速, u^* 为地表剪切速度, K 为冯卡门常数(这里取 $K = 0.4$), z_0 为地表粗糙高度, z 为模拟位置高度, d 为零位移平面高度. 为使高度在 25m 处的风速与实际情况保持一致, 在近地面(0~25m)人为增加 4 排数据, 地面数据赋 0m/s, 以 WRF 提供的风速为参考风速. 基于上述对数律风场分布规律进行插值, 分别得到 0m、5m、10m 和 18m 四个高度处的风速值, 从而考虑 25m 内的风速分布:

$$u_c = u_s \times \frac{u}{u_{25}}. \quad (6)$$

其中 u_c 为人为插值点风速, u_s 为 WRF 模拟的 25m 高度处的实际风速, u_{25} 为由式(5)计算得到的 25m 高度处风速. 将式(6)换算的插值点风速与 WRF 所模拟的风速进行整合, 然后利用多项式拟合的方法可得到 CFD 的入口边界, 其示意图如图 3 所示.

2.3 大涡模拟参数设置

CFD 数值模拟过程中, 地形数据利用 DEM 数字高程数据, 采用实际尺寸, 计算域大小取 10km×9km×3km, 如图 4 所示.

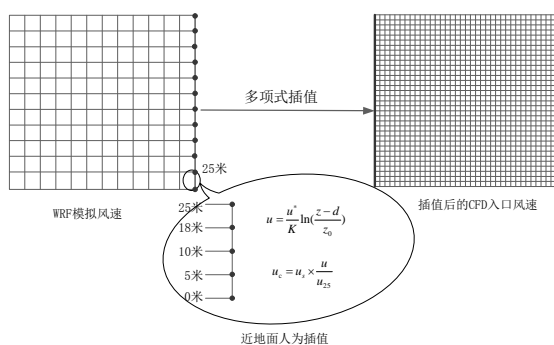


图 3 网格插值示意图

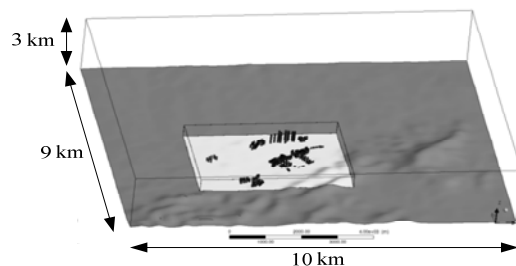


图 4 计算域

模型采用混合网格划分技术, 小区核心计算域为四面体网格, 其余区域为六面体网格, 四面体和六面体网格交界处用 Interface 进行对接. 网格在近地面和建筑物附近进行加密, 通过无关性测试后模型的总网格数为 8625413, 如图 5 所示. 在边界条件上, 入口采用 WRF 提供的速度场, 每 15min 更新一次边界条件, 地表采用无滑移边界, 顶面采用自由滑移边界, 侧面采用对称边界, 出口采用压力出口. 在求解方面, 对 N-S 方程采用 PISO 方法进行求解, 对流项和扩散项均采用二阶中心差分格式, 用超松弛方法(SOR)求解压力 Poisson 方程, 所有工况在路易斯安娜州立大学(LSU)的 Super-mike 超算中心进行.

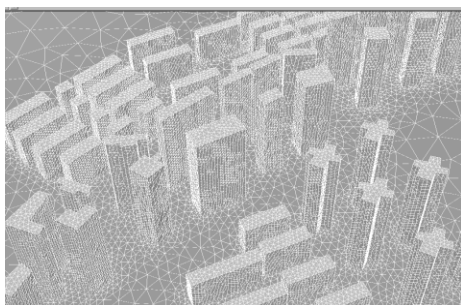


图 5 计算网格

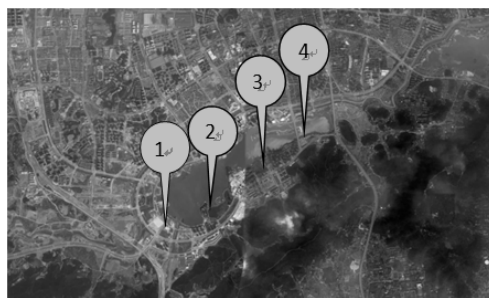


图 6 风速监测站

2.4 计算结果验证

为验证文本数值模拟结果的正确性, 在梅溪湖小区安装了四个手持式风速仪, 用于监测数值模拟当天小区内的实时风场数据. 为排除建筑物对局部风场的影响, 风速仪均安装在地形相对开阔的区域, 具体安装位置如图 6 所示, 各监测位置如图 7 所示.

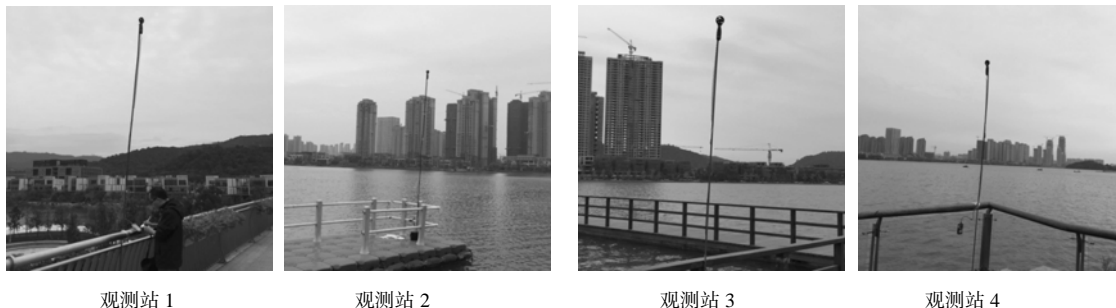


图 7 风速仪布置图

通过对小区四个位置的风速进行实时监测, 得到了监测位置在 2015 年 10 月 27 日 10:00~17:00 的风速时程, 将现场实测数据与模拟结果进行对比, 其结果如图 8 所示. 从图 8 中可以发现, 数值模拟结果与实际情况吻合较好, 基本能反映城市风场的真实流态, 也验证了本文数值模型的正确性.

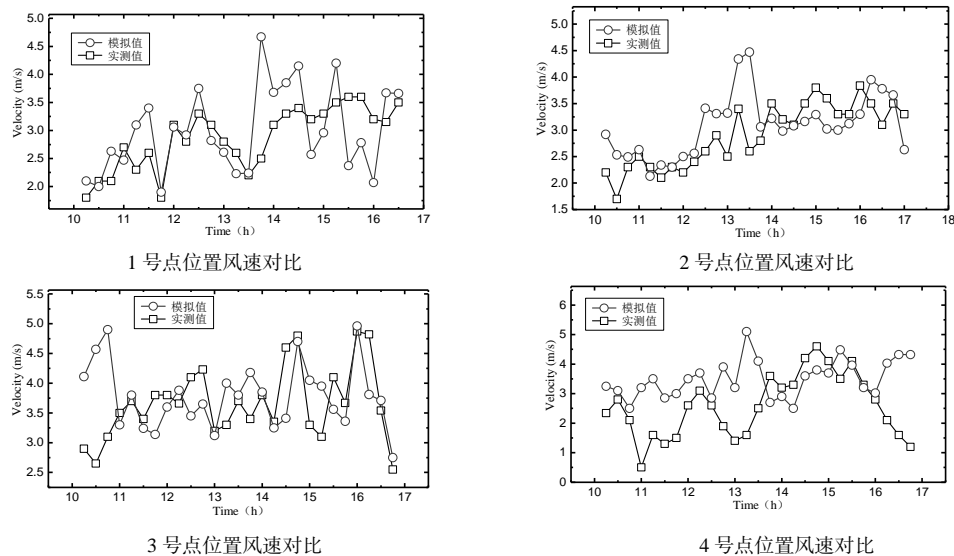


图8 风速时程对比图

3 梅溪湖风环境大涡模拟研究

3.1 梅溪湖小区多尺度耦合分析

为得到梅溪湖小区内部的详细流场, 在第2节所述模型基础上, 再次对CFD模型进行缩尺耦合分析, 缩尺后的小模型计算域如图9所示. 其中, 计算域大小为 $4315\text{m} \times 3111\text{m} \times 950\text{m}$. 由于小区模型较为复杂, 整个模型采用四面体网格进行划分, 网格在近地面和建筑物附近加密, 同样在LSU的Super-mike超算中心进行计算.

模拟过程中, 将大模型内部的监测风速同样用多项式插值的方法赋给小模型的入口边界. 同时, 为对梅溪湖小区风场进行详细分析, 对监测数据的风剖面进行拟合, 拟合结果如图10所示.

为得到不同风向角作用下小区内部风场分布, 以图10所述边界为基础, 对8种不同来流风向角作用下的小区风环境进行分析, 其示意图如图11所示.

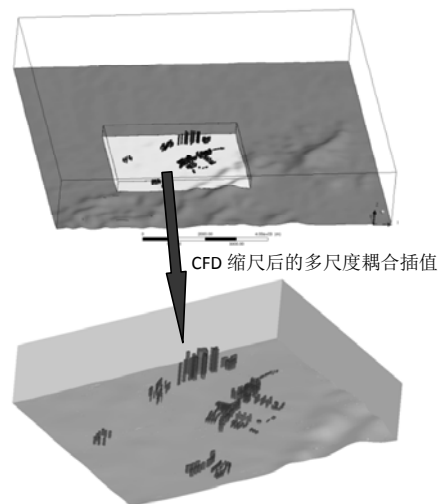


图9 CFD多尺度耦合插值示意图

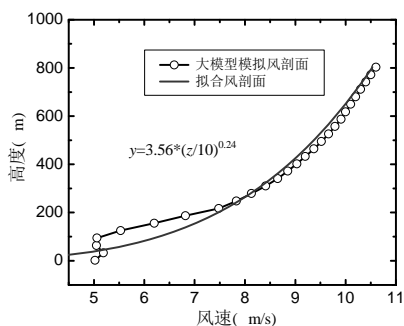


图10 小模型入口风剖面监测值

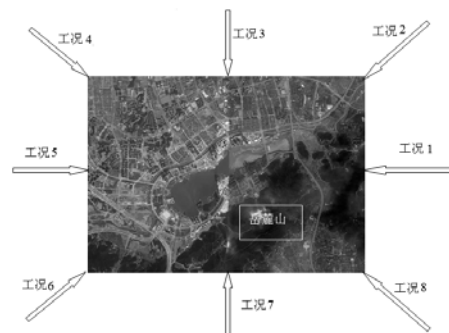


图11 模拟工况

3.2 计算结果

长沙夏季受亚热带季风气候影响, 吹东南风; 冬季受西伯利亚寒流影响, 吹西北风. 工况4和工况8分别代表这两种主导风向的入口来流, 对其进行计算得到的速度云图分别如图12和图13所示.

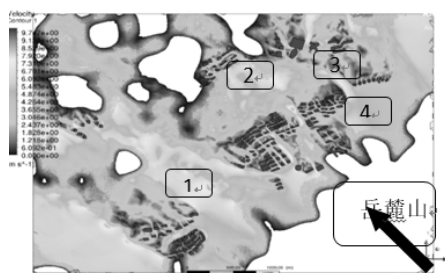


图 12 夏季风作用下小区水平方向速度云图

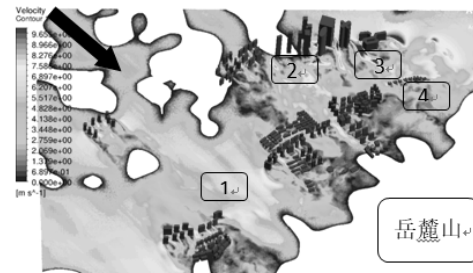


图 13 冬季风作用下小区水平方向速度云图

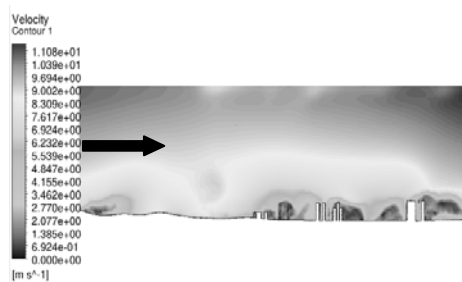


图 14 夏季风作用下小区竖直方向速度云图

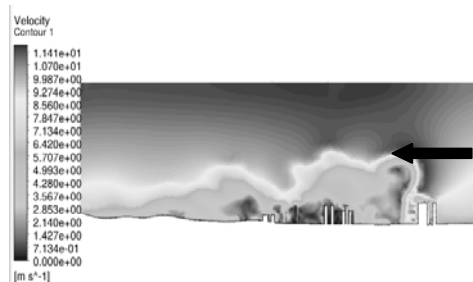


图 15 冬季风作用下小区竖直方向速度云图

在梅溪湖小区里面, 人居活动较多的区域为图 12 和图 13 中黑色框标识区. 其中, 1 号区域为观光公园所在地; 2 号区域为活动广场; 3 号区域为商场; 4 号区域是学校和运动场所. 这些区域人口密度较大, 其风环境更具代表性. 通过将两种不同工况下的风速进行对比可以发现: 1 号区域由于没受到建筑物的阻挡, 其风速在冬季和夏季基本持平; 2 号和 4 号区域在冬季风作用下风速明显低于夏季风, 主要原因是冬季风作用下 2、4 号区域由于有高密建筑群的阻挡, 使得风速降低. 而需要引起重视的是 3 号区域, 由于受到高大建筑物的影响, 在该区域的冬季风速相比其它地方的风速有着明显增大. 图 14 和图 15 分别给出了冬季和夏季主导风向作用下的小区竖直方向的速度云图. 图中黑色箭头为风速来流方向, 从图中亦可发现, 不管是冬季风还是夏季风, 建筑物背风侧风速相比迎风侧风速都有明显的减小.

为了得到上述四个区域更详细的风场分布, 对该区域中心位置沿高度方向的风速进行监测, 所有工况作用下风速剖面分布情况如图 16 所示.

图 16 给出了不同工况下人居活动较多区域的风速剖面图, 从图中可以发现, 1、2 号区域由于相对空旷, 没有受到建筑物的阻挡, 其风速剖面相对稳定, 说明在空旷地区, 不同风向角作用下风速大小变化不大. 但对于 3 号和 4 号区域, 由于地处建筑群附近, 其风场在竖直方向相比 1、2 号位置有明显不同, 特别是 3 号区域, 风场在近地面极其紊乱, 这种现象说明了复杂建筑群给周围风场带来了较大扰动. 3 号区域近地面最大风速出现在 4 号工况(即当来流风为西北风时), 此时由于高大建筑的干扰使得风场加速效应显著, 应做好防风措施, 以免出现风速过

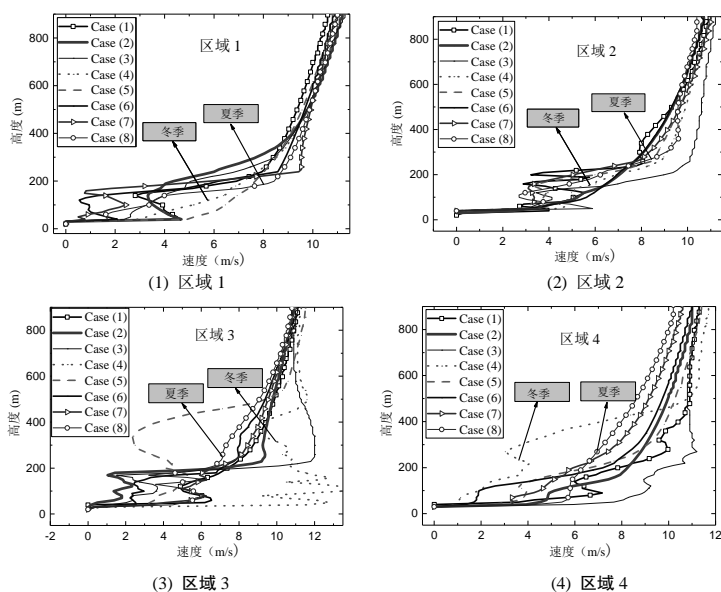


图 16 不同工况作用下风剖面示意图

大引起人行不舒适. 3号区域人行高度最低风速出现在2号工况(即当来流风为东北风时), 其风速最小, 这时污染物容易积聚. 从图16亦可发现, 在1、2、3号区域, 当高度大于600m以后, 风速大小基本趋于稳定, 其数值与入口来流的风向角变化关系不大. 但对于4号区域, 其风速大小不管是在近地面还是在远离地面都存在较大的差异, 在近地面最大风速出现在3号工况, 为正北方向, 主要原因是此时该区域风场没有受到阻挡; 最小风速出现在4号工况, 此时风速受到了建筑物的阻挡, 风速明显变小. 同时, 4号区域在高度大于600m以后风速出现的明显不一致现象, 主要是因为4号区域地处岳麓山附近, 当入口来流方向不同时, 受到复杂的山体地形影响使得风速出现较大的差异. 从图中还可发现, 当高度大于600m以后, 最大风速出现在工况4, 最小风速出现在工况8, 即当入口来流风为西北风时, 风场在高空没有受到阻挡, 但来流风为东南风时, 该区域正好处在岳麓山的背风侧, 使得其风速较小.

从上述分析可知, 梅溪湖小区不同区域的风场受局部地物与地貌的影响较大, 在建筑群的背风侧一般风速较低, 迎风侧风速较大. 同时, 在平坦地区, 风速大小随风向角的变化差异不大, 但在建筑群或山体附近, 不同的风向角会产生较大差异的风速.

4 结论

本文以长沙市梅溪湖国际社区为研究对象, 基于多尺度耦合技术建立了 WRF-CFD、CFD-CFD 的耦合缩尺模型, 对小区内部的风场进行了详细数值模拟, 得到了以下结论:

(1) 基于 WRF-CFD 多尺度耦合技术, 得到了与实际情况一致的入口边界条件, 并通过现场实测数据, 验证了本文方法的正确性.

(2) 通过对小区人行高度风环境进行全方位分析, 发现该小区不同区域的风场受局部地物与地貌的影响较大, 在建筑群的背风侧一般风速较低, 迎风侧风速较大.

(3) 通过分析小区竖直方向风场发现, 在平坦地区, 风速大小随风向角的变化差异不大, 但在建筑群或山体附近, 不同的风向角会产生较大差异的风速.

参考文献

- [1] 王宇婧. 北京城市人行高度风环境 CFD 模拟的适用条件研究[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2012
- [2] Penwarden A D, Wise A F E. *Wind environment around buildings*[M]. HMSO, 1975
- [3] Han Yan, Shen Lian, Xu Guojie, et al. *Multiscale simulation of wind field on a long-span bridge site in mountainous area*[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 177: 260~274
- [4] 刘 熠. 山区峡谷桥址处风场特性实测研究与数值模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学硕士学位论文, 2014
- [5] 李 朝, 肖仪清, 滕 军, 等. 基于超越阈值概率的行人风环境数值评估[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 15~21
- [6] 张 玥, 胡兆同, 刘健新. 西部山区地形的斜拉桥风场特性研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(12): 154~159
- [7] 程雪玲, 胡 非, 崔桂香, 等. 街区污染物扩散的数值研究[J]. *城市环境与城市生态*, 2004, (4): 1~4
- [8] 陈政清, 李春光, 张志田, 等. 山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验[J]. *实验流体力学*, 2008, 22(3): 54~59
- [9] 胡峰强. 山区风特性参数及钢桁架悬索桥颤振稳定性研究[D]. 上海: 同济大学博士学位论文, 2006
- [10] Maurizi A, Palma J M L M, Castro F A. *Numerical simulation of the atmospheric flow in a mountainous region of the North of Portugal*[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1998, 74~76(2): 219~228
- [11] 胡 朋, 李永乐, 廖海黎. 山区峡谷桥址地形模型边界过渡段形式研究[J]. *空气动力学报*, 2013, 31(2): 231~238
- [12] Mochida A, Iizuka S, Tominaga Y, et al. *Up-scaling CWE models to include mesoscale meteorological influences*[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2010, 99(4): 187~198
- [13] Ashie Y, Kono T. *Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area*[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 174~188
- [14] Castro F A, Santos C S, Costa J C. *Development of a meso-microscale coupling procedure for site assessment in complex terrain*[J]. *EWEA - European Wind Energy Association*, 2010: 1~10
- [15] Baik J J, Park S B, Kim J J. *Urban Flow and Dispersion Simulation Using a CFD Model Coupled to a Mesoscale Model*[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2009, 48(8): 1667~1681
- [16] Liu Yushi, Miao Shiguang, Zhang C L, et al. *Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model*[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2012, s 107~108(8): 106~117
- [17] Xie Zhengtong, Castro I P. *Large-eddy Simulation For Flow And Dispersion In Urban Streets*[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(13): 2174~2185
- [18] 王晓君, 马 浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1191~1199
- [19] 沈桐立. 数值天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 2010
- [20] Deardorff J W. *The Use of Subgrid Transport Equations in a Three-Dimensional Model of Atmospheric Turbulence*[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1973, 95(3): 4292~438