

基于CFD不同布局下的高层建筑群风环境模拟

张宇佳, 闫 铂

吉林建筑大学土木工程学院, 吉林 长春
Email: www.1452523263@qq.com

收稿日期: 2020年12月21日; 录用日期: 2021年1月24日; 发布日期: 2021年2月3日

摘 要

针对高层建筑群因为不恰当建筑布局导致的恶性气流问题, 及对高层居住区居民日常生活造成的困扰。研究6幢方形高层建筑组成的建筑群周围的风环境特征, 利用FLUENT软件模拟不同建筑布局下的气体流动特点。通过对比、分析不同建筑布局下室外人行高度(1.5 m)处的风速云图和风速矢量图, 得出建筑布局与风环境优劣之间存在的关系。

关键词

数值模拟, 风环境, 建筑布局

Wind Environment Simulation of High-Rise Buildings Based on Layouts of CFD

Yujia Zhang, Bo Yan

School of Civil Engineering Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin
Email: www.1452523263@qq.com

Received: Dec. 21st, 2020; accepted: Jan. 24th, 2021; published: Feb. 3rd, 2021

Abstract

Aiming at the malign airflow problem caused by improper building layout of high-rise buildings and the troubles caused to the daily life of residents in high-rise residential areas, wind environment characteristics around 6 square high-rise buildings were studied, and the software FLUENT was used to simulate gas flow characteristics under different building layouts. By comparing and analyzing the wind speed cloud map and wind speed vector map at the outdoor pedestrian height (1.5 m) under different building layouts, the relationship between building layout and wind environment was obtained.

Keywords

Numerical Simulation, Wind Environment, Building Layout

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着现代化进程日益加快,大量人口涌入城市,导致城市土地资源越来越稀缺。高层建筑、密集型建筑的出现,在一定程度上解决了土地利用问题,节约了土地资源,但必然导致一些负面影响。不当的建筑布局易形成“狭管效应”,导致建筑区域内局部风速过大,对行人的活动造成不便。或引起建筑背风面风速过小,不利于有害气体的排除,影响市民的健康。探讨不同建筑布局下风环境的优劣,从而提出合理有效的改善措施十分重要。

Murakami 在 1986 年发表的论文中,提出采用雷诺时均方法的数值模拟,不但能确保模拟精度,而且还可以充分利用有限的计算资源,提高模拟的效率[1]。Stathopoulos 等通过对平行排列布局下的七幢矩形截面进行数值模拟,验证了建筑群周围风速分布与风洞试验结果吻合良好[2]。T. R. Oke 等人在城市建筑布局形态与热环境相关性方面做了大量的研究,指出了建筑布局形态对室外环境温度的影响关系[3]。Chang 等应用 FLUENT 软件和四种不同的 $k-\epsilon$ 模型对房屋平行布局时相邻建筑间的涡流集中情况进行了模拟分析,并且考虑了街道宽度和房屋高度之比取不同的数值时对峡谷涡流的影响[4]。周莉等人利用 FLUENT 软件对 3 幢平行排列的高层建筑进行数值模拟,考虑了不同建筑间距对建筑表面风压的影响[5]。C. W. Tsang 等人通过模拟、对比、分析高层建筑室外人行高度处的风速分布图,利用风洞试验从宽度、高度、建筑间距及角度对试验结果进行了总结与分析[6]。Garry Palmer 等以剑桥大学一栋新建楼房为研究对象,介绍了 CFD 算法则对该建筑进行数值模拟的过程,同时以另外一个建筑实例为对象,研究了建筑群体的风环境舒适性问题[7]。Tetsu 对 22 个住宅小区进行风洞试验,分析了住宅小区建筑物密度与整个小区内部风速变化、行人舒适度之间的关系,并为住宅区建筑覆盖率的改善提出指导意见[8]。王泰等[9]利用 FLUENT 软件,对同一地块在 3 种不同建筑布局形式下,高层建筑对周围低层、多层建筑的风环境模拟,得出了高层建筑布置在住区四周、内部以及两侧时,对周围低层、多层建筑会存在不同的影响。赵凝等[10]以中国北方的养老建筑的组团实例为主,结合日本案例作为补充,提出了行列式、围合式、串联式三种建筑布局方式为北方地区适宜的建筑组团布局样式。

本文利用 FLUENT 软件模拟不同建筑布局下室外人行高度(1.5 m)处的风速云图和风速矢量图,得出建筑布局与风环境优劣之间的关系,为居住区环境建设、特别是高层建筑群建筑布局的规划提供参考意义。

2. 模型的建立

2.1. 建筑模型

2.1.1. 建筑模型的确定

建筑模型由 6 幢同尺寸大小的建筑组成,分别标记为 A、B、C、D、E、F,具体尺寸为 20 m × 20 m × 100 m (长 × 宽 × 高)。建筑布局共 8 种,整体呈中轴对称。根据布局形式特点,分别命名为 H、Y、反 Y、V、反 V、U、反 U、O 型(图 1,表 1)。从图 1,表 1 中可知 LAF'(量符号为 L_{LAF})代表各个建筑群

中前排建筑 A 与 F 之间的横向间距; L_{BE}' (量符号为 L_{LBE}')代表各个建筑群中的中间排建筑 B 与 E 之间的横向间距; L_{CD}' (量符号为 L_{LCD}')代表各个建筑群中的后排建筑 C 与 D 之间的横向间距。

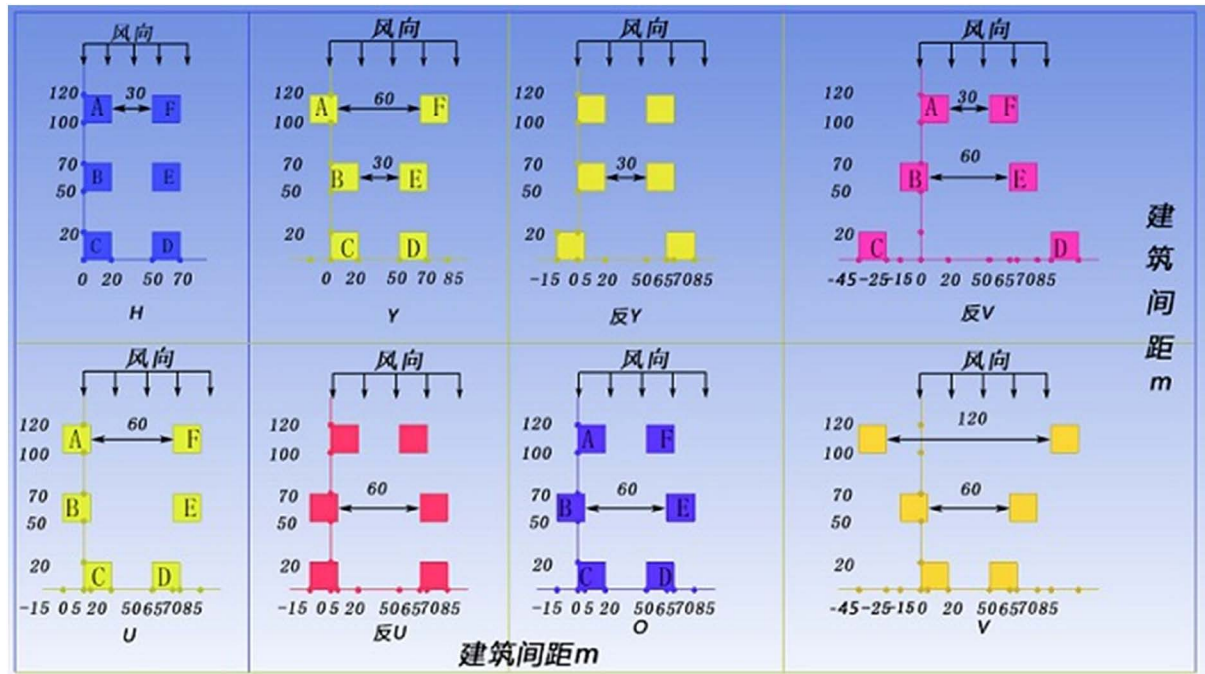


Figure 1. Eight types of plane layout of typical building
图 1. 8 种典型建筑群平面布局类型

另外, 根据 Ying 等人在“Application of building ventilation space in residential area’s layout”一文中的结论, 当相邻建筑间纵向和横向基本间距为 1.5 倍建筑宽度时, 室外风环境最佳[11]。因此, H 型建筑布局中相邻建筑间的基本间距为 $L = 30\text{ m}$ 。其余建筑布局下的建筑间距详见图 1。

Table 1. The horizontal spacing ratio of each row of building in eight typical building layouts
表 1. 8 种典型建筑布局中各排建筑水平间距比值

布局类型	$L_{LAF}' : L_{LBE}' : L_{LCD}'$
the layout type	$L_{LAF}' : L_{LBE}' : L_{LCD}'$
H 型	1:1:1
Y 型	2:1:1
V 型	4:2:1
U 型	2:2:1
O 型	1:2:1
反 Y 型	1:1:2
反 V 型	1:2:4
反 U 型	1:2:2

2.1.2. 评价方法

本文对建筑群风环境的评估标准主要是依据不同建筑布局下室外人行高度(1.5 m)处的风环境特征,

采用定性与定量分析相结合的手段。定性分析人行高度处的风速云图和风速矢量图, 通过模拟得到的数据定量分析人行高度处的最大风速、最大风压等。

风速云图可以直观的反应计算域中人行高度处的风速分布情况, 风速矢量图则可以定性的分析计算域中各点的空气流动方向。最大风速是指计算域中人行高度处所有点的最大风速值, 最大风压是指计算域中某一测点处的最大风压。

风速比是室外测点处风速的绝对值与同高度下初始来风风速绝对值之间的比值[2]。计算公式为:

$$R = V_s / v$$

式中, R 为风速比, V_s 为测点风速, v 为初始来风风速。

Tetsu 的研究表明, 若某区域的风速比大于 2.0 时, 行人会感到风速过快, 不利于出行; 风速比小于 0.5 时, 该区域的风速过低, 易形成紊流, 不利于污染气体的排除[8]。因此, 本文统一规定, 评价风环境的标准风速比控制在 0.5~2.0 最佳。

2.2. 模型边界条件的设定

2.2.1. 模拟流程

建筑风环境的研究方法主要包括现场实测、风洞试验以及计算流体动力(computational fluid dynamics, CFD)等。现场实测主要是通过对已建成的建筑物周围进行布置测点, 观测在长期风环境作用下对建筑产生的影响。风洞试验是目前研究建筑风环境最有效的方法之一, 但是存在模拟结果不够精确、实验耗散成本较高等缺点。随着高性能计算机技术的进步, 以及 CFD 数值模拟方法的发展, 采用数值模拟代替风洞试验的方法逐渐被大量的应用于风环境的研究中, 并且取得了不错的研究成果[12]。本文计算采用 ICEM CFD 进行前处理, 步骤包括: 建立几何模型与计算域、划分网格以及设定边界条件。采用 FLUENT 软件进行求解, 步骤主要涉及检查网格; 选择求解器、湍流模型; 设置材料属性、边界条件; 初始化流场以及求解。利用 result 进行后处理, 获得各种建筑布局下的风压、风速云图和矢量图。

2.2.2. 模拟区域大小

在建立了简化的模型后, 需要确定有效的计算区域。计算区域的精确程度, 对计算结果的影响至关重要, 因此需要通过反复试验, 得到一个相对精确的计算区域。原则上, 在数值模拟过程中, 当建筑迎风面在入口面占比小于 3%时, 计算域的尺度取值较为合理[13]。经过反复的研究和计算, 本文中选取的计算区域大小为 1620 m × 1160 m × 500 m。计算域俯视图如图 2 所示。

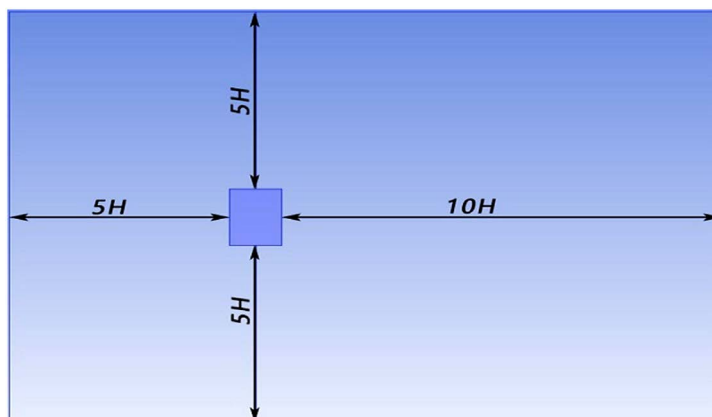


Figure 2. Computes the top view of the domain

图 2. 计算域俯视图

网格质量的好坏影响着计算结果的精确度和准确性。本文采用非结构网格划分计算区域, 非结构网格是没有规则的拓扑关系网格, 具有较高的灵活性, 可以简化几何结构复杂的下垫面的网格划分[14]。建筑表面和地面网格划分详见图 3, (以 H 型建筑平面布局为例)。

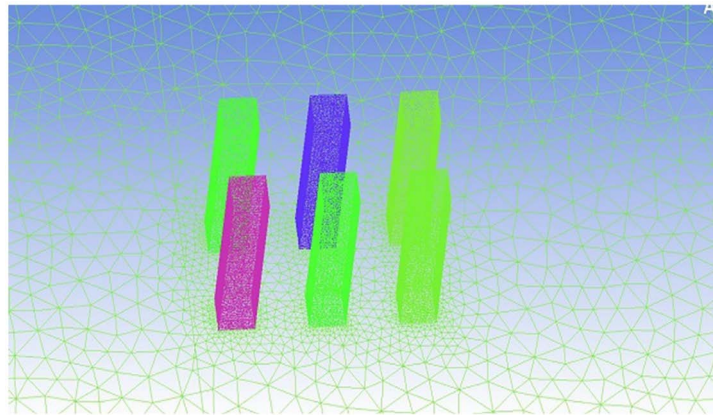


Figure 3. The H-shaped building are divided into unstructured grids
图 3. H 型建筑群划分非结构化网格

2.3. 边界条件的确定

2.3.1. 入口边界条件

采用入口速度边界条件(velocity-inlet)。由于存在地表的摩擦作用, 随着离地高度的减小, 接近地表的风速也会随之降低。当离地高度在 300~500 m 以上时, 风速流动会摆脱地表摩擦力的影响, 可以在大气梯度的作用下自由流动。本文中, 对于来流风速的变化规律, 我们选用指数率来表示:

$$U_{(z)}/U_{(z_G)} = (z/z_G)^\alpha$$

其中 $U_{(z)}$ 表示为任意高度 z 处的平均风速, $U_{(z_G)}$ 表示为标准高度 z_G 处的平均风速, 指数 α 表示为大气边界层厚度指数, 本文中 α 取 0.35。

2.3.2. 出口边界条件

定义出口为自由出流边界 outflow, 假设出流边界已经充分发展, 出流方向上所有流动变量的扩散量为零, 不存在回流现象[15]。

2.3.3. 固体壁面边界条件

由于建筑物表面与地面是相互固定的, 两者之间没有相对运动, 因此模型表面和计算区域边界的地面采用无滑移的壁面条件(wall)。由于两个侧面都远离建筑物, 因此可以认为两个侧面对建筑物周围的空气的流动没有影响, 采用对称边界条件(symmetry)。

3. 模拟结果

本文对不同建筑布局形式下的建筑群周围风环境进行模拟计算, 具体平面布局详见图 1。

1) 8 种建筑布局形式下室外人行高度处的风速云图如图 4 所示。

由图 4 可见: ① 型、正 Y 型、O 型建筑布局下的最大风速接近, 最大风速约为 6.25 m/s 左右; 反 Y 型与反 U 型建筑布局下的最大风速略大于上述第一种类型的建筑布局, 最大风速约为 6.85 m/s; 反 V 型建筑布局下的风速大于其他建筑布局下的最大风速, 约为 7.07 m/s; 正 V 与正 U 型建筑布局下的最大风速低

与正 Y 型建筑布局下风速情况基本一致, 后排建筑内部存在狭管效应, 风速增大; 反 V 型建筑布局下, 风环境情况与正 V 建筑布局下正好相反, 风速最大区域出现在前排建筑内侧。正 U 型建筑布局下, 建筑内侧流速高于外侧, 在下游建筑尾部风速较小, 易形成紊流区。反 U 型建筑布局下, 最大风速区出现在前排建筑内侧, 中间和下游建筑受到前排建筑的影响, 内侧风速明显低于外侧风速。O 型建筑布局下, 前排建筑内侧以及中间建筑外侧风速较大, 其余区域均为风影区, 空气流动性较差。

3) 8 种建筑布局下建筑表面风压云图如图 6 所示。



Figure 6. Wind pressure cloud maps under eight plane layouts

图 6. 8 种平面布局下风压云图

由图 6 易知, ① 从建筑表面最大风压来分析, 正 V 型建筑表面风压最大, 其次是反 Y 型 > 反 V 型 > H 型 > O 型 > 正 U 型或正 Y 型, 反 U 型建筑表面最大风压略低于其他平面布局形式。② 从建筑表面最小风压来分析, 反 U 型 > H 型 > 反 V 型 > O 型 > 反 Y 型 > 正 Y 型 > 正 U 型或正 V 型。③ 从建筑表面风压差来分析, 反 U 型建筑布局下, 建筑表面风压差最小; H 型建筑布局下, 建筑表面风压差略大于反 U 型建筑布局形式; 反 V 型建筑布局与 O 型建筑布局形式的建筑表面风压差接近; 正 Y 型建筑布局与反 Y 型建筑布局下, 建筑表面风压差接近; 正 V 型建筑布局下, 建筑表面风压差最大。④ 8 种建筑布局中, 最大风压均出现在前排建筑, 其中 H 型、反 Y 型、正 V 型以及反 V 型这四种建筑布局下, 最大风压出现在前排建筑上方, 约占前排建筑面积的 22%。正 Y 型、正 U 型、反 U 型以及 O 型建筑布局下, 最大风压区约占前排建筑面积的 82%。

4. 结论

本文研究 6 幢方形高层建筑组成的建筑群周围的风环境特征, 利用 FLUENT 软件模拟不同建筑布局下建筑群周围的空气流动情况。通过对比、分析不同建筑布局下, 室外人行高度(1.5 m)处的风速云图和风速矢量图。得到以下结论:

① 当入口处的间距大于出口处的间距时, 出口处风速增长幅度最大, 形成最不利的风环境。如正 V 布局中的 C、D 建筑, 正 U 布局中的 C、D 建筑; ② 当入口处的间距小于出口处的间距时, 入口处的风环境恶化, 但是出口处的风环境明显好转。如反 Y 布局中的 B、E 建筑。③ 当入口处与出口处的间距相同时, 最大风速出现在入口处, 但是数值明显减小。如 H 型布局中的 A、F 建筑。

综上所述, O 型建筑布局下建筑周围风环境最优, 其次是 H 型建筑布局, 对于反 Y 型、反 V 型和反 U 型布局, 内部存在狭管效应和风速加强现象, 在日常建筑布局中应该尽量避免。

参考文献

- [1] Murakami, S. (1986) Current Status and Future Trends in Computational Wind Engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **1**, 3-34. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00230-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00230-4)
- [2] Stathopoulos, T. and Baskaran, A. (1996) Computer Simulation of Wind Environment Conditions around Building. *Engineering Structures*, **18**, 876-885. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00155-7](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00155-7)
- [3] Oke, T.R. (1973) City Size and Urban Heat Is Land. *Atmospheric Environment* (1967), **7**, 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- [4] Chang, C.H. and Meroney, R.N. (2003) Concentration and Flow Distributions in Urban Street Canyons: Wind-Tunnel and Computational Data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**, 1141-1154. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(03\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(03)00056-4)
- [5] 周莉, 席光. 高层建筑群风场的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 471-474.
- [6] Tsang, C.W., Kwok, K.C.S. and Hitchcock, P.A. (2012) Wind Tunnel Study of Pedestrian Level Wind Environment around Tall Building: Effects of Building Dimensions, Separation and Podium. *Building and Environment*, **49**, 167-181.
- [7] Palmer, G., Vazquez, B. and Knapp, G. (2004) The Practical Application of CFD to Wind Engineering Problems. *8th International IBPSA Conference*, Eindhoven, 11-14 August 2003, 995-1000.
- [8] Tetsu, K., Masao, M., Yoshihide, T., et al. (2008) Wind Tunnel Tests on the Relationship between Building Density and Pedestrian-Level Wind Velocity: Development of Guidelines for Realizing Acceptable Wind Environment in Residential Neighborhoods. *Building and Environment*, **43**, 1699-1708. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.015>
- [9] 王泰, 李培. 基于风环境的高层与周围低层、多层建筑布局方式选择[J]. 安徽建筑, 2020, 27(8): 25-27.
- [10] 赵凝, 陈旸. 北方地区大型养老建筑组团式布局模式研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(8): 1-5.
- [11] Ying, X.Y. and Kazunori, H. (2011) Application of Building Ventilation Space in Residential Area's Layout. *63rd International Symposium on Crop Protection*, Gent, 24 May 2011, 289-301.
- [12] Blocken, B. and Persoon, J. (2009) Pedestrian Wind Comfort around a Large Football Stadium in an Urban Environment: CFD Simulation, Validation and Application of the New Dutch Wind Nuisance Standard. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **97**, 255-270. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.007>
- [13] 杨易, 金新阳, 杨立国. 薄膜结构风荷载数值模拟的新方法和应用[C]//中国土木工程协会. 第十四届全国结构风工程学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2009: 896-901.
- [14] 周大伟, 黄本才, 郑本辉, 徐再根, 王国俭. 金茂大厦平均风压及周围风环境干扰数值风洞模拟[C]//中国土木工程学会, 中国空气动力学会. 第十一届全国结构风工程学术会议论文集. 三亚: 中国土木工程学会, 2004: 453-459.
- [15] Min, J.Q. and Xu, Z.B. (2006) Multi-Ventilation Indoor Temperature Field and Air Quality Numerical Analysis. *Fluid Machinery*, No. 12, 29-33.