

高层建筑排列形式对城市风环境影响数值模拟研究

雷 圆¹, 曹开法²

¹上海理工大学机械工程学院, 上海

²安徽科创中光科技股份有限公司, 安徽 合肥

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月19日; 发布日期: 2025年6月26日

摘 要

现今城市地区高层建筑密集, 其不同排列形式会对城市风环境造成不同的影响。本文利用数值模拟技术, 通过选取了高层建筑1.5 m处、2/3高程处以及风场 $y = 267.5$ m处三种典型截面, 研究了横形排列、竖形排列、方形排列三种不同的排列工况对城市风环境的影响, 结果表明: 方形排列建筑整体受到的压力载荷和气流速度都最小, 出现气流回流涡流的地方均靠近建筑物迎风面和背风面, 对其余建筑影响较小, 建筑群排列方式方形排列最佳。

关键词

高层建筑, 排列形式, CFD技术

Numerical Simulation Study on the Impact of High-Rise Building Arrangement on Urban Wind Environment

Yuan Lei¹, Kaifa Cao²

¹School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Anhui Kechuang Zhongguang Technology Co., LTD., Hefei Anhui

Received: May 26th, 2025; accepted: Jun. 19th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

Nowadays, high-rise buildings are densely distributed in urban areas, and their different arrangement forms will have different impacts on the urban wind environment. This paper uses numerical

simulation technology to select three typical cross-sections of high-rise buildings at 1.5 m, 2/3 elevation, and $y = 267.5$ m in the wind field to study the impact of three different arrangement conditions on the urban wind environment: horizontal arrangement, vertical arrangement, and square arrangement. The results show that the pressure load and airflow velocity of the square-arranged building are the smallest, and the places where the airflow vortex appears are close to the windward and leeward sides of the building, which has little impact on the other buildings. The square arrangement is the best arrangement of the building complex.

Keywords

High-Rise Buildings, Arrangement, CFD Technology

Copyright © 2025 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

随着科技发展以及人口数量提升, 现今城市地区的高层建筑越发密集。密集的高层建筑往往会造成城市风环境流动紊乱, 在较低处会降低建筑附近过往人员的舒适性[1], 在较高处则容易对建筑表面造成较大压力负载, 使得墙皮等表面物体脱落, 造成安全隐患[2]。

对此, 国内外已有不少学者对建筑周围风环境影响进行了数值模拟研究。胡荻[3]研究了强风环境下低矮建筑的载荷效应, 结果表明, 建议风沙地区低矮建筑围护结构设计时的局部风压体型系数 μ_{s1} 取值: 屋面角部增大 15%, 屋面、墙面边缘区域增大 10%。杨辛[4]对风环境影响下的高层建筑形态设计策略进行了研究, 结果表明, 依据绿色建筑评价体系, 可以提取总结出风环境的评价体系, 以此检验建筑设计过程中及实际运行中的风环境状况。蔡悦倩[5]基于风环境研究了建筑布局形态的设计策略, 总结出了不同设计阶段形态因素对风环境的影响机制, 并归纳出基于风环境影响的建筑布局形态的设计优化策略。谢海英[6]等人研究了建筑高度对建筑群行人高度处的风场及污染物扩散的影响, 结果表明, 建筑高度对风场和污染物浓度场有显著的影响, 当域内建筑与周围建筑高度相同时, 行人高度处的风速较小而污染物浓度在所有工况中最大。Kim [7]等人研究了在低层建筑群中单个高层建筑对环境风的影响, 结果表明, 单个高层建筑可增加其行人高度处的时均和面均风速。

本文通过建立物理模型, 利用数值模拟技术研究了横形排列、竖形排列、方形排列三种不同的排列工况对城市风环境的影响, 研究工作也为城市高层建筑排列形式给出了一定的指导建议。

2. 模型建立

2.1. 物理模型

本文利用 solidworks 建立符合国家标准的[8]高层建筑和城市风场的几何模型, 通过改变高层建筑排列方式来模拟不同城市风场工况, 再导入 spaceclaim 进行边界命名以及共享拓扑, 如图 1 所示。高层建筑高度 H 为 90 m, 长度 L 为 30 m, 宽度 W 为 50 m, 相邻高层建筑间距 D 为 25 m。城市风场高度取 $3H$, 风场入口与第一个建筑面距离取 $3H$, 出口与最后一个建筑面距离取 $6H$ 。

2.2. 数学模型

本文采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型(Jones & Launder, 1972)来对城市建筑风场内的气流组织进行仿真模拟,

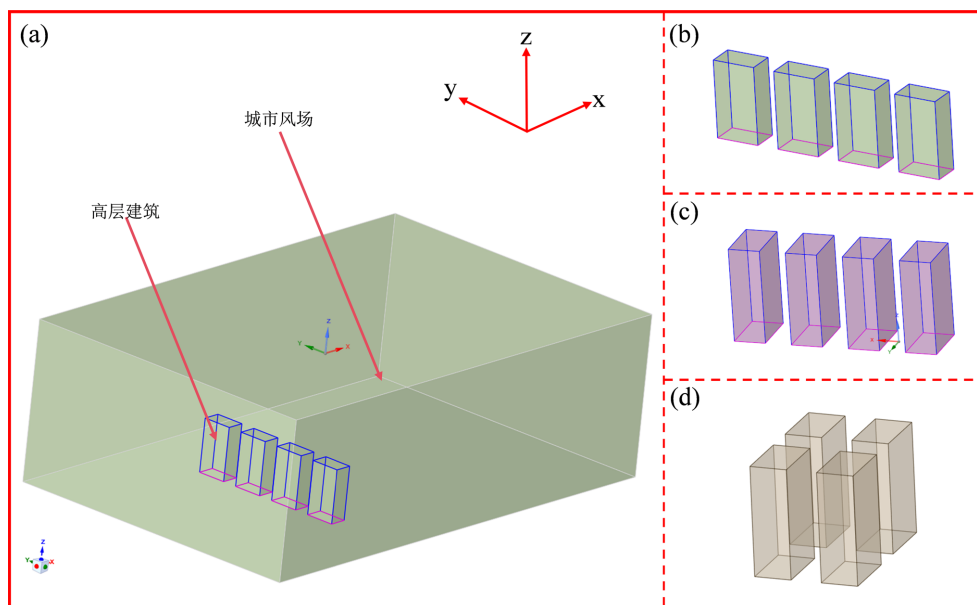


Figure 1. Physical model of urban wind field environment with high-rise buildings in different arrangements: (a) overall model; (b) horizontal arrangement; (c) vertical arrangement; (d) square arrangement

图 1. 不同排列形式高层建筑城市风场环境物理模型: (a) 整体模型; (b) 横形排列; (c) 竖形排列; (d) 方形排列

其中包含连续性方程, 能量守恒方程以及 $k-\varepsilon$ 方程[9]。为简化仿真问题, 做出如下假设: 城市风场环境和建筑物地面都是固定的, 不会产生相对运动, 故底面采用无滑移边界条件; 流场两侧距高层建筑较远, 两侧流场边界对建筑物影响可忽略, 故两侧边界采用对称边界条件; 城市风场环境内流动形式为湍流流动。由于本文研究只考虑流动和压力, 不考虑温度, 不开启能量方程。

依据上述假设条件, 城市建筑风场内环境气流流通方程可写成如下所示:

(1) 连续性方程

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

其中 u_i 为速度矢量, 单位为 m/s。

(2) 湍流动能 K 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (2)$$

(3) 湍流动能耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

其中, ρ 为密度, kg/m^3 ; u_i 为速度, m/s ; μ 为动力黏度, $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$; k 为湍流动能; ε 为耗散率; 对于标 $k-\varepsilon$ 准模型来说, 有 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

3. 网格划分

本文采用 SpaceClaim 进行模型前处理, 提取流体域并对边界命名, 共享拓扑后利用 FluentMeshing 进行网格划分, 采用六面体和四面体混合网格。为保证仿真的准确性, 对风场的进出口添加了边界层网格,

划分后的网格如图 2 所示。

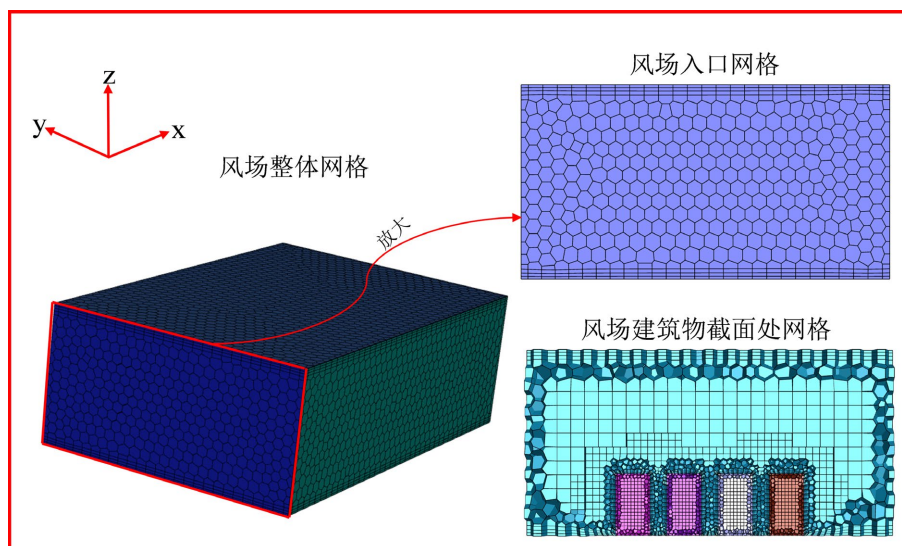


Figure 2. Urban building wind field environment grid
图 2. 城市建筑风场环境网格

4. 边界条件

风场上下边界面设置为无滑移壁面(wall), 两侧边界设置为对称边界条件(symmetry)。入口设置为速度入口边界(Velocity-inlet), 且速度大小与高度的关系如式(4)所示。出口设置自由出流(outflow), 任意物理量在流场出口的法向梯度都为零。

$$\frac{v(z)}{v_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (4)$$

式中, α 为地面粗糙度, 取 0.3; z_{ref} 为参考高度, 取 15 m; v_{ref} 为参考高度处风速, 取 10 m/s。

5. 结果分析

对于高层建筑来说, 其周围气流流动十分复杂, 容易因为建筑之间的相互影响而产生回流涡旋, 使过往人员感觉不适, 因此选取高层建筑的 1.5 m 高度处截面进行分析[10] [11]。高层建筑随着高度增大, 气流速度也随之增大, 建筑与建筑之间容易相互影响, 产生气旋, 可能使建筑间的有害气体难以排出[12], 或造成墙皮脱落等风险, 故选择建筑 2/3 高程处进行分析[13]。为更好地了解城市建筑风场环境整体在建筑物迎风面前及背风面后的气流流动情况, 选取风场中间截面 $y = 267.5$ m 处气流流动分布进行分析。

5.1. 1.5 m 高程处高层建筑排列形式对城市风环境影响分析

图 3 为三种排列形式的高层建筑 1.5 m 高程处压力载荷分布。由图 3 可看出, 三种排列形式下, 压力随着距离建筑物迎风面距离减小而增大, 随着距离建筑物背风面距离增大而增大, 临近高层建筑迎风面区域压力最大, 在建筑背风面均出现负压区。如图 3(a)所示, 横形排列的高层建筑在建筑物迎风面高压区域较大, 竖形排列和方形排列的高压区仅出现在建筑物迎风面临近区域。横形排列四个高层建筑物迎风面压力载荷均较大, 容易出现墙皮脱落等问题; 竖形排列高层建筑第一个建筑物迎风面承受压力载荷最大, 后三个建筑物迎风面承受压力载荷较小; 方形排列高层建筑迎风面承受压力载荷最小, 能有效

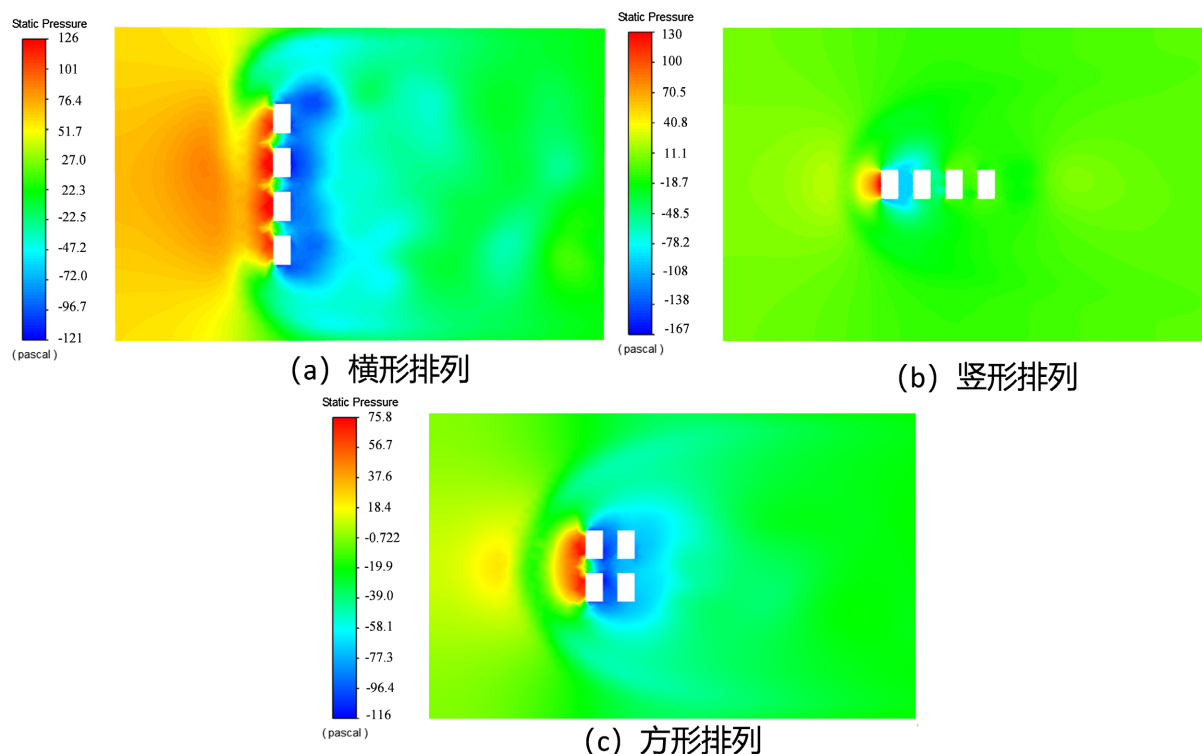


Figure 3. Pressure distribution at 1.5 m for high-rise buildings with different arrangements
图 3. 不同排列形式高层建筑 1.5 m 处压力分布

降低建筑物墙皮等掉落风险。三种排列方式的建筑物两侧压力分布整体呈对称趋势, 符合正常情况下的风压变化趋势。

图 4 为三种排列形式的高层建筑 1.5 m 高程处速度分布。由图 4 可以看出, 三种排列形势下, 建筑物迎风面两侧以及建筑物间隔区域风速较大, 建筑物迎风面正向位置和背风面速度较小, 最低速度为 0 m/s。因为建筑物间隔相比整体流场很小, 气流从宽阔区域流入狭窄区域会导致速度激增。在横形排列下, 相邻高层建筑间的气流速度较大, 可能会导致行走人员有一定的吹风感。在竖形排列下, 第一个建筑物迎风面两侧贴近建筑壁面区域气流激增, 最大气流大于 15 m/s, 建筑物后方气流较小, 出现气流死区建筑物周围区域气流分布较为均匀。方形排列下, 最大气流速度出现在建筑间隔区域, 建筑物迎风面两侧区域气流速度在 5 m/s 左右。三种排列方式的建筑物速度分布整体呈对称趋势, 最大气流速度均出现在建筑物迎风面两侧和间隔区域。

5.2. 2/3 高程处高层建筑排列形式对城市风环境影响分析

图 5 为三种排列形式的高层建筑 2/3 高程处压力分布。由图 5 可看出, 三种排列形式的高层建筑在 2/3 高程处压力分布与 1.5 m 处分布趋势大致相同。压力最高点出现在建筑物迎风面, 建筑物背风面存在负压区。压力随着距建筑物迎风面距离增大而增大。2/3 高程处压力均大于 1.5 m 处, 因为随着高度增加, 风场入口速度增加, 导致建筑物迎风面压力增大。在该高程处, 横形排列的四个高层建筑迎风面受到压力最大, 方形排列的高层建筑迎风面受到压力最小, 竖形排列高层建筑在第一个建筑物背风面出现负压区, 在第二三个建筑背风面和迎风面压力分布都较为均匀。

图 6 为三种排列形式的高层建筑 2/3 高程处速度分布。由图 6 可看出, 三种排列方式的高层建筑在 2/3 高程处速度最大点均出现在建筑物迎风面拐角和建筑物相邻间隔区域, 最小速度出现在建筑物背风

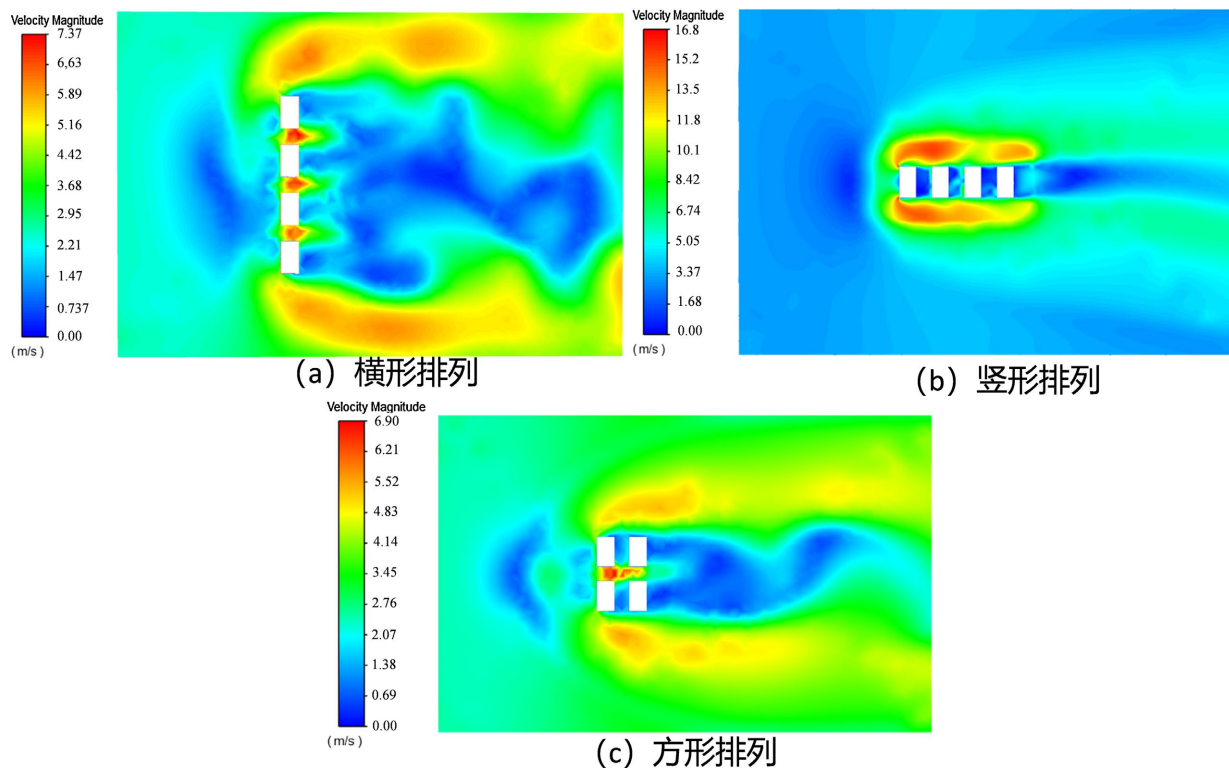


Figure 4. Velocity distribution at 1.5 m for high-rise buildings with different arrangements

图 4. 不同排列形式高层建筑 1.5 m 处速度分布

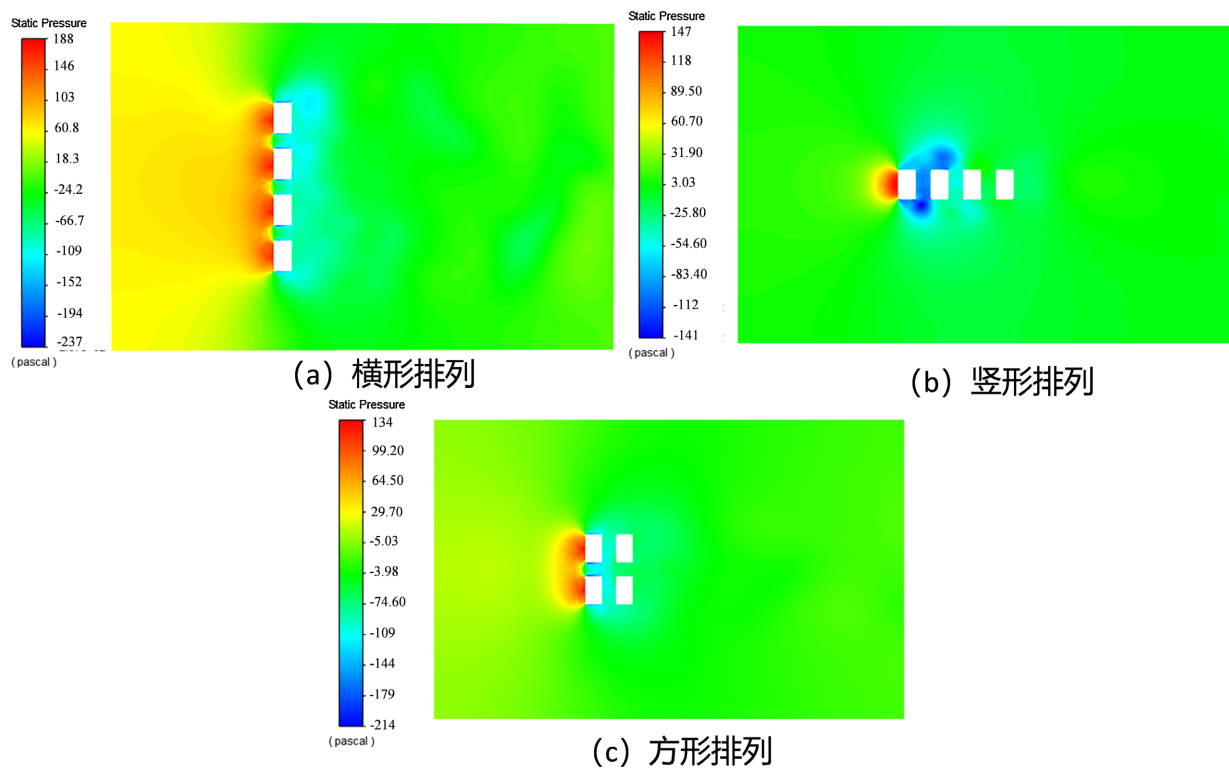


Figure 5. Pressure distribution at 2/3 of high-rise buildings with different arrangements

图 5. 不同排列形式高层建筑 2/3 处压力分布

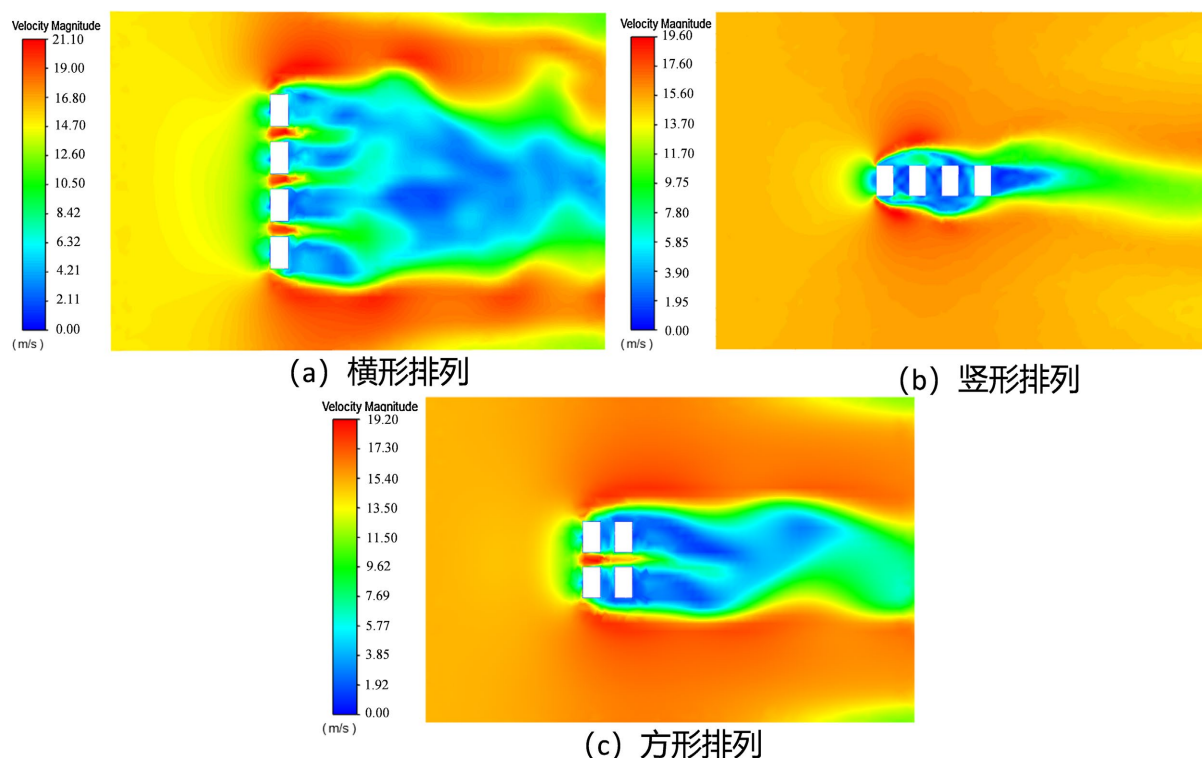


Figure 6. Velocity distribution at 2/3 of high-rise buildings with different arrangements

图 6. 不同排列形式高层建筑 2/3 处速度分布

面, 为 0 m/s。在竖形排列和方形排列建筑周围都出现稳流区域, 横形排列此时由于建筑物迎风面积较大, 导致建筑物周围气流流动相比其它两种排列方式较为紊乱。竖形排列建筑背风面后方此时速度极小, 不利于换气。方形排列在该高程处受到的最大气流速度最小, 建筑物背风面也有气流流通, 能有效地对建筑物背风面的污染物排放及换气。

由图 7 可知, 在 1.5 m 高程处, 横形排列、竖形排列和方形排列建筑受到最大压力分别为 126 pa、130 pa 和 75.8 pa, 流场内最大速度分别为 7.37 m/s、16.80 m/s 和 6.9 m/s。在 2/3 高程处, 横形排列、竖形排列和方形排列建筑受到最大压力分别为 188 pa、147 pa 和 134 pa, 流场内最大速度分别为 21.1 m/s、19.60 m/s 和 19.20 m/s。在 1.5 m 高程处时, 横形排列建筑和竖形排列建筑受到的最大压力相近, 差值仅为 4 pa, 流场内速度竖形排列建筑远大于横形排列和方形排列, 其中方形排列建筑受到的最大压力和流场内最大速度均最小。在 2/3 高程处, 横形排列建筑受到的最大压力和流场内最大速度均最大, 方形排列建筑与竖形排列建筑相似, 此时方形排列建筑受到的最大压力和流场内最大速度均最小。

5.3. 风场 $y = 267.5$ m 处城市风环境影响分析

由图 8 可看出, 在城市建筑风场 $y = 267.5$ m 截面处, 横形排列建筑上方区域风速最大, 三种排列方式气流速度最小值均为 0 m/s。竖形排列建筑背风面回流涡流较多, 出现气流死区。横形排列建筑在建筑迎风面和背风面低位区域回流和小型涡流较多, 均出现气流死区。方形排列建筑在建筑间隔区域有速度突变, 整体气流流动形式与横形排列相似, 在建筑迎风面和背风面有气流回流, 背风面后方气流混合较为均匀, 低位气流较小, 不会使过往人员有明显吹风感, 高位气流速度也在接受范围内, 不会使高层建筑受强风吹拂导致墙皮掉落等危害。

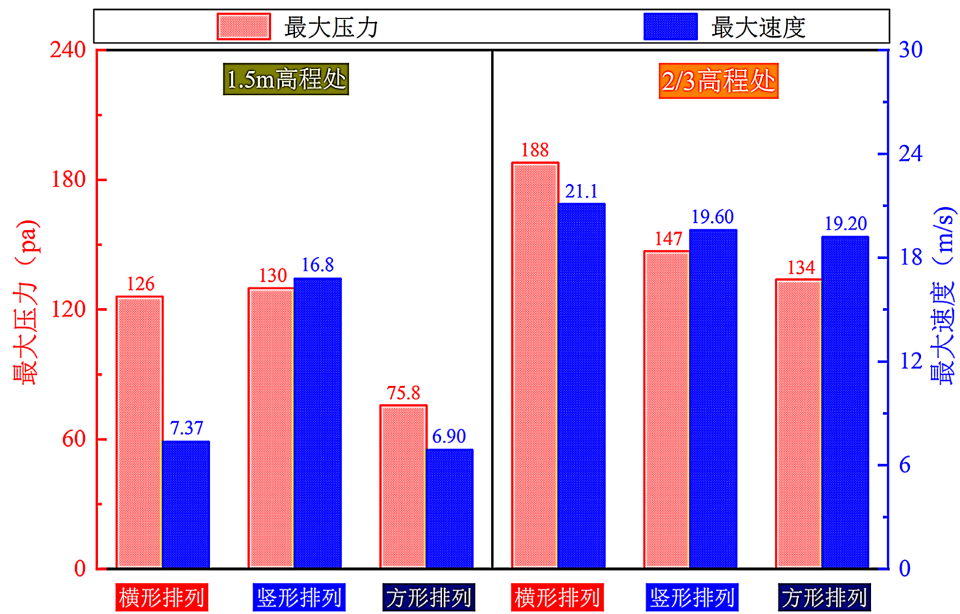


Figure 7. Maximum pressure and velocity of buildings with different arrangement forms at two elevations
图 7. 两种高程下不同排列形式建筑受到最大压力及速度

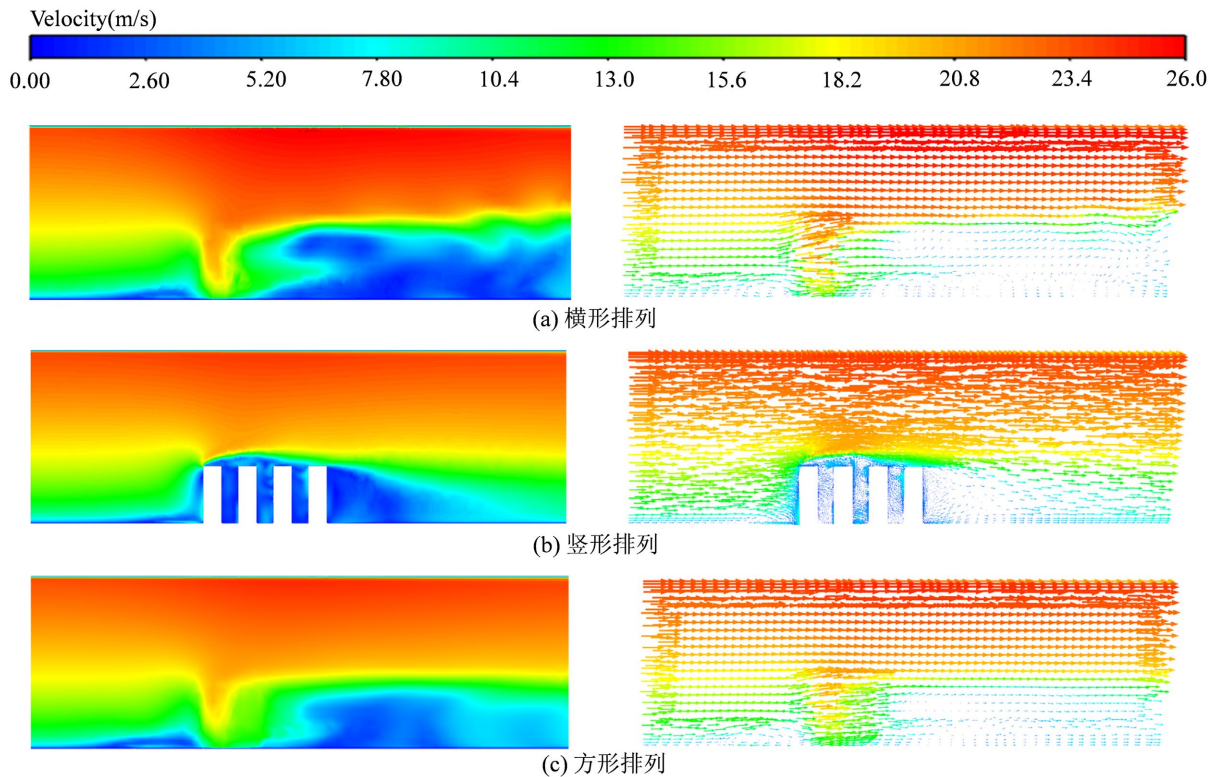


Figure 8. Velocity distribution at $y = 267.5$ m for high-rise buildings with different arrangements
图 8. 不同排列形式高层建筑 $y = 267.5$ m 处速度分布

6. 结论

本文利用数值模拟技术, 通过选取高层建筑 1.5 m 处、2/3 高程处以及风场 $y = 267.5$ m 处三种典型截

面, 研究了横形排列、竖形排列、矩形排列三种不同的排列工况对城市风环境压力载荷分布和气流速度分布的影响, 得到了以下结论:

(1) 三种排列形式下, 压力都随着距离建筑物迎风面距离减小而增大, 随着距离建筑物背风面距离增大而增大, 临近高层建筑迎风面区域压力最大, 在建筑背风面均出现负压区。

(2) 在高层建筑 1.5 m 高程处, 横形排列每个建筑受到的压力载荷都较大, 竖形排列建筑第一个建筑迎风面受到的压力载荷最大, 且建筑两侧气流较大容易导致过往人员有明显吹风感, 方形排列建筑迎风面受到压力载荷最小。

(3) 在 2/3 高程处横形排列建筑背风面气流较为紊乱, 且受到的压力载荷最大, 方形排列和竖形排列建筑背风面气流较为稳定, 受到的压力载荷较小。

(4) 方形排列建筑整体受到的压力载荷和气流速度都最小, 且气流死区较少, 因为方形排列高层建筑为两行两列形式, 比起单一的横形排列和竖形排列其建筑群能更好地对气流起到分流和分压的效果。出现气流回流涡流的地方均靠近建筑物迎风面和背风面, 对其余建筑影响较小, 建筑群排列方式方形排列最佳。

参考文献

- [1] 邹琼, 张嘉龙, 王雅平. 多层建筑屋顶风场的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2021, 38(1): 208-215.
- [2] 刘新辉, 闫铂, 张宇佳. 高层建筑形状对城市风环境影响的模拟研究[J]. 建筑安全, 2023, 38(2): 29-32.
- [3] 胡荻. 强风沙环境下低矮建筑荷载效应的数值研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2024.
- [4] 杨辛. 风环境影响下的高层建筑形态设计策略[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [5] 蔡悦倩. 基于风环境的建筑布局形态设计策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [6] 谢海英, 张天霄, 杨怡. 建筑高度对建筑群行人高度处的风场及污染物扩散影响的数值模拟[J]. 能源研究与信息, 2023, 39(3): 147-152.
- [7] Kim, J., Baik, J., Han, B., Lee, J., Jin, H., Park, K., et al. (2022) Tall-Building Effects on Pedestrian-Level Flow and Pollutant Dispersion: Large-Eddy Simulations. *Atmospheric Pollution Research*, 13, Article ID: 101500. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101500>
- [8] 黄小坤. 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ3-2010)修订[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 1-7.
- [9] Jones, P.J. and Whittle, G.E. (1992) Computational Fluid Dynamics for Building Air Flow Prediction—Current Status and Capabilities. *Building and Environment*, 27, 321-338. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90033-I](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90033-I)
- [10] 徐晓达. 超高层建筑周边行人高度处平均风速分布特性及风环境评估[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [11] 王同军. 高层建筑群行人高度风环境数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2012.
- [12] 王泰. 城市居住区高层建筑对周边邻近建筑的风环境影响研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2018.
- [13] 周费宏. 基于 CFD 技术的大风条件下建筑群风环境与风荷载数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.