

山地丘陵地区局域风流变化路径分析

——以黄贤村为例

史雨蒙, 傅军, 李洁

浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年4月14日; 录用日期: 2023年7月10日; 发布日期: 2023年7月14日

摘要

风环境是影响居民舒适度因素的重要部分。山地丘陵地区地貌复杂, 风流被显著改变从而影响舒适度。以浙江省宁波市黄贤村为案例, 根据实测和数值模拟数据对比验证了CFD数值模拟的准确性。然后从风流路径变化的角度利用Fluent软件对室外风环境进行数值模拟研究。根据数值模拟结果, 对当前黄贤村的室外风环境进行了评价和分析: 该地区室外风环境整体较好, 体感较舒适, 但部分区域风速较低, 影响居民生活质量。最后提出布局优化方案以改善风环境。提出的分析方法有助于优化山地丘陵地区风环境设计。

关键词

山地丘陵地区, 风环境, CFD模拟, 风流路径, 优化设计

The Analysis of Local Air Flow Change Paths in Mountainous and Hilly Areas

—A Case Study of Huangxian Village

Yumeng Shi, Jun Fu, Jie Li

School of Architectural Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 14th, 2023; accepted: Jul. 10th, 2023; published: Jul. 14th, 2023

Abstract

Wind environment is an important part of factors that affect residents' comfort. Mountainous and hilly areas have complex landforms and dramatic changes in wind currents that affect comfort. Taking Huangxian Village, Ningbo City, Zhejiang Province as a case study, the accuracy of CFD nu-

merical simulation is verified by comparing the measured data with the numerical simulation data. Then, the outdoor wind environment was numerically simulated using Fluent software from the perspective of air flow path changes. Based on the numerical simulation results, the current outdoor wind environment in Huangxian Village was evaluated and analyzed. The outdoor wind environment in this area is generally good and comfortable, but in some areas, the wind speed is relatively low, affecting the quality of life of residents. Finally, a layout optimization scheme is proposed to improve the wind environment. The proposed analysis method is helpful for optimizing the wind environment design in mountainous and hilly areas.

Keywords

Mountainous and Hilly Areas, Wind Environment, CFD Simulation, Air Flowpath, Optimal Design

Copyright © 2023 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

我国是一个多山地的国家，山地地形占全部国土面积的 65%。随着城镇化的快速发展，平原地区的面积已经不满足于未来发展，因此逐渐利用山地丘陵地区进行城市建设和风资源开发。由于山地环境中热交换和地形复杂等原因，当气流流经山地丘陵地区时，近地气流的风速、风压等将被显著改变，使得该地区的风流场与平原地区相比，显现出较为明显的差异，导致风环境改变，影响场地利用和居住舒适度。因此，对山地丘陵地区进行局域风流变化路径分析具有重要的意义。

为了更好地进行山地丘陵地区建筑群选址和工程设计，基于 CFD (计算机流体力学技术) 技术的风环境分析近年来逐渐受到研究人员的重视[1]-[7]。Gaur N [8]等探讨了 CFD 技术在风环境模拟中的最新应用，并与传统的风洞实验进行对比。Guo W H 等[9]从场地规划、建筑形状和建筑维护结构三个方面介绍了通过 CFD 风环境模拟优化建筑自然通风的方法和案例研究，以便为解决建筑设计与技术分析之间的不匹配和协同性差提供一些思路。Hou Y 等[10]通过现场试验和数值模拟，分析了中国南方地区建筑物的自然通风，并对通风增强技术进行了揭示和总结。肖仪清等[11]针对某复杂地形进行了 CFD 数值模拟，并把模拟结果和现场实测风速进行比较，最后提出基于 CFD 模拟的全风向风能评估方法。刘滨谊等[12]进行了以同济大学彰武路宿舍区为模型的风环境实测，并进行 CFD 模拟，提出了适应风环境的绿地布局优化策略。文献阅读表明：由于地形变化的差异，风环境分析尚不能形成普适性规律，需要按个例进行工程设计，笔者课题组对浙江省宁波市黄贤村进行了现场测试和 CFD 模拟，取得了较为满意的效果[13][14][15][16][17]。

文献调研表明，基于风流路径描述山地丘陵地区风环境研究方面的成果尚不多，本文将浙江省宁波市黄贤村的实际地形为案例，采用良态风来流建立模型，先根据实测数据进行相应 CFD 数值模拟，验证用 CFD 数值模拟进行风环境评估的可行性，然后利用 Fluent 软件对室外风环境进行数值模拟，以风流变化路径为视角进行分析，并提出工程设计优化方法。

2. CFD 数值模拟可行性验证

2.1. 风环境数据实测

浙江省宁波市奉化区黄贤村三面环山、一面临海，住区总体排布整齐，空间布局上以主干道为轴线

分布不同高度建筑群，地形和实景如图 1 所示。应用 HWS1000 穿戴式多功能手持气象站进行测点高度为 1.5 m 人行范围的监测，每 6 秒自动记录一次，共 6 h。手持气象站相关参数见表 1。根据实地调查，大致将黄贤村建筑群分为三部分，分别为农居小区、低矮居住建筑 and 旅游居住建筑。每一区域设置手持气象站进行监测，共设置 6 个测点如图 2。



Figure 1. Real scene of Huangxian Village

图 1. 黄贤村实景



Figure 2. Zoning map of Huangxian Village

图 2. 黄贤村分区图

Table 1. Parameters of hand-held weather station

表 1. 手持气象站参数指标

风速测量范围	0~50 m/s
风速测量精度	±0.5 m/s (0~15 m/s)
风向测量精度	±2° (误差不超过±10°)

2.2. 风场数值模拟参数设置

从 BIGMAP 中下载高精度雷达影像数据，生成 TIF 格式文件并利用 ArcGIS 软件创建建筑面绘制边界，最后用 Sketch Up 软件生成地形模型。为了节约计算成本，本次模拟将建筑简化为理想物块，模型总面积约 $1.07 \text{ km} \times 1.20 \text{ km} \times 0.25 \text{ km}$ 。

黄贤村周围三面环山，粗糙下垫面对来流风的影响用幂函数表示，表达式为：

$$V_{(z)} = V_s \left(\frac{Z}{Z_s} \right)^\alpha$$

其中， Z_s 为参考的标准高度，取 10 m； $V_{(z)}$ 离地面 Z 米处风速大小； V_s 为标准高度处风速，取奉化黄贤气象站实测当日记录的平均风速 2.93 m/s； α 为地面粗糙度系数。我国《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012) 中规定的不同地面的粗糙度系数取值见表 2，黄贤村属于山地丘陵地区房屋比较稀疏的乡镇， α 取 0.16。由此得出入流风速随高度变化如图 3。

Table 2. Chinese standard 4 types of landforms

表 2. 我国规范 4 类地貌

类别	下垫面性质	α
A	近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	0.12
B	田野、乡村、丛丘陵及房屋比较稀疏的乡镇	0.16
C	有密集建筑群的城市市区	0.22
D	有密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30

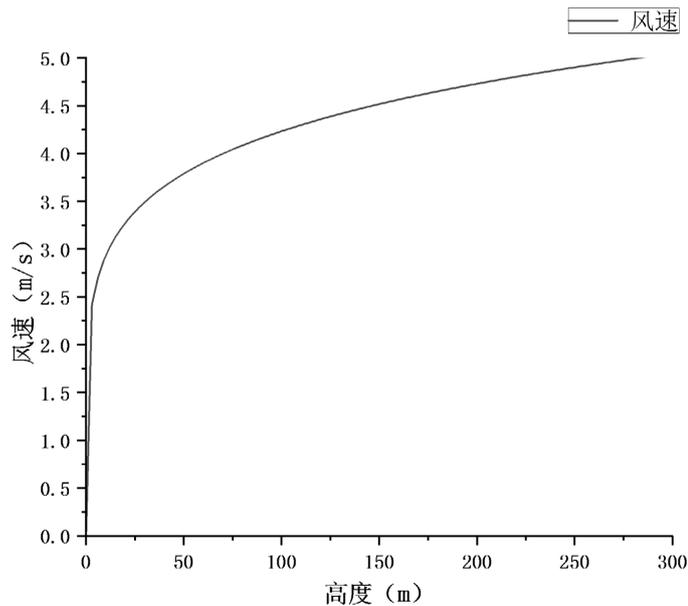


Figure 3. Variation of inlet wind speed with height

图 3. 入流风速随高度变化图

计算域边界条件设置如下：以目标建筑尺寸为 H ，计算域以地形模型为基准，向四周和上方延伸大约 $3H$ ，即 $3.5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$ ，以长方体形状创建。计算区域建模如图 4，速度入口边界(velocity-inlet)为入口边界条件，来流方向为北风，对面设为压力出口(pressure-outlet)，另外两个侧面和顶面采用对称边界条件(symmetry)，底面及建筑物表面采用无滑移壁面条件(wall)，地面粗糙度为 0.16 m。

网格方面采用具有良好的灵活性和适应性的六边形非结构网格。在流域中网格尺寸自模型向外逐渐增大，远离建筑的网格逐渐变稀疏如图 5，总计网格数约为 141 万个。参考《绿色建筑评价标准》(GB/T

50378-2019)中对室外风环境模拟建议, 主要关注 1.5 m 高度处的流场, 湍流模型选择 Standard k- ϵ 。算法采用 SIMPLE 算法, 数据收敛精度至 10^{-5} 。

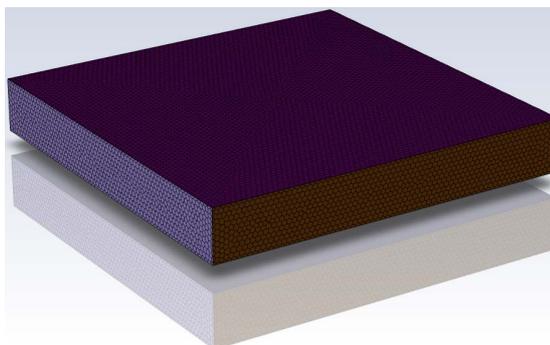


Figure 4. Grid schematic diagram

图 4. 网格示意图

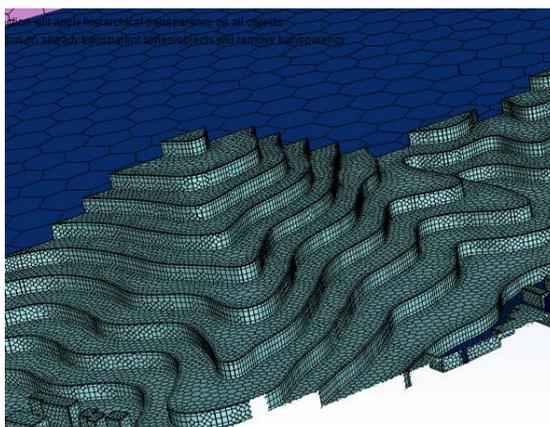


Figure 5. Grid details diagram

图 5. 网格细节示意图

2.3. 风场实测与数值模拟结果对比

考虑到风速的不稳定性以及需要和 CFD 数值模拟结果进行比对, 本次采用的实测数据为各测点风速平均值。提取 CFD 数值模拟中相应的测点的风速值, 将各测点实测数据与数值模拟数据比对, 进行线性回归分析如图 6。R² 代表曲线回归的拟合程度, 越接近 1 效果越好, 拟合结果 R² = 0.875, 可见模拟结果和实测结果拟合较好, 证明了 CFD 风环境数值模拟的准确性, 可用于之后的风流变化路径分析。

3. 案例计算

3.1. 参数设置

本次风流路径分析的风流源数据来源是奉化黄贤气象站所监测的黄贤村 2007 年~2021 年十五年风资料数据(监测高度为 10 m)。根据十五年的风数据统计得出年平均风速为 1.82 m/s, 主导风向为北风(N)如图 7。根据舒适度要求, 当风速低于 5 m/s 时, 人的感觉是舒适的。具体模拟方法同前述, 其中标准高度处风速改为 1.82 m/s, 共设置 10 个测点, 均为各个建筑群附近或山底处, 根据地貌和建筑群布局情况, 划分成两条风流路径, 即路径① (P1~P5)、路径② (P6~P10)如图 8。

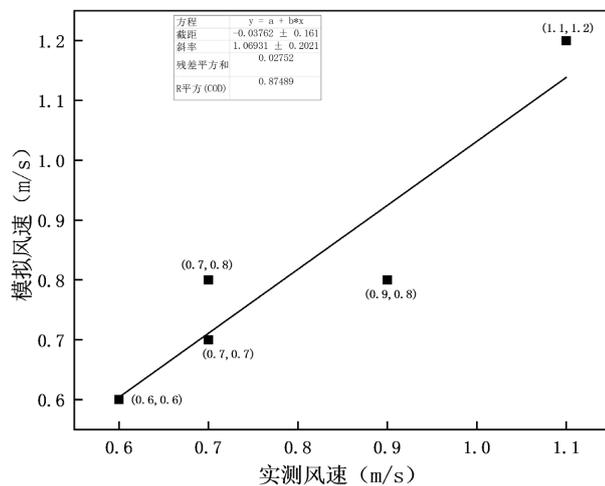


Figure 6. Real measurement and simulation wind speed linear regression chart

图 6. 实测与模拟风速线性回归图

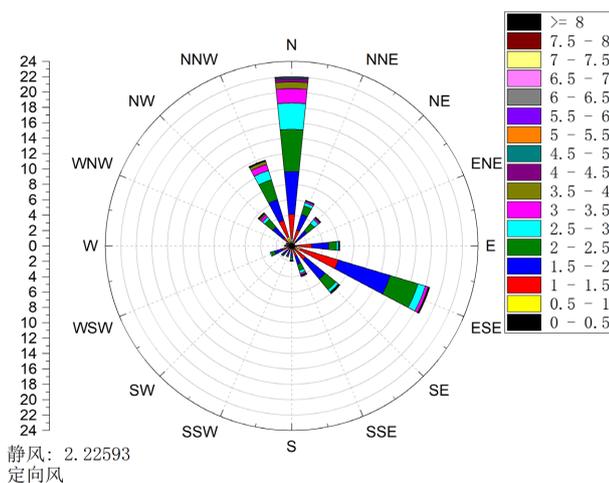


Figure 7. Statistics of wind direction from 2007~2021

图 7. 2007~2021 年风向统计

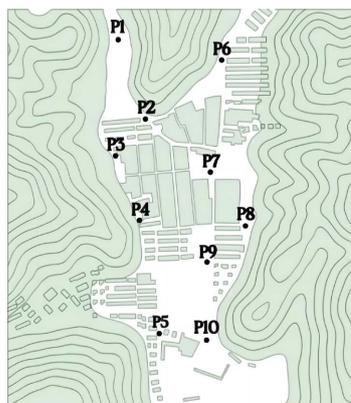


Figure 8. Diagram of the measurement point layout

图 8. 测点布置示意图

3.2. 风场数值模拟结果

计算得到奉化黄贤村风环境模拟风速云图如图 9 和风矢量图如图 10，本次模拟选定的测点处观测的风速数据见图 11~图 14。

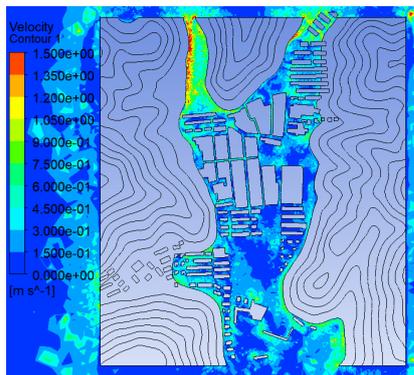


Figure 9. Wind speed cloud map

图 9. 风速云图

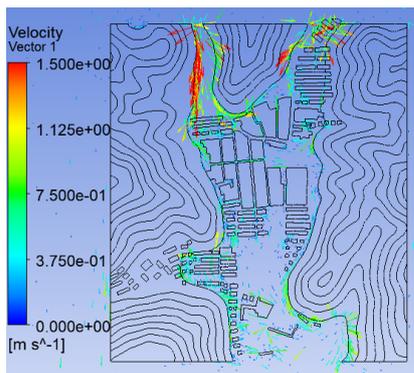


Figure 10. Wind vector

图 10. 风矢量图

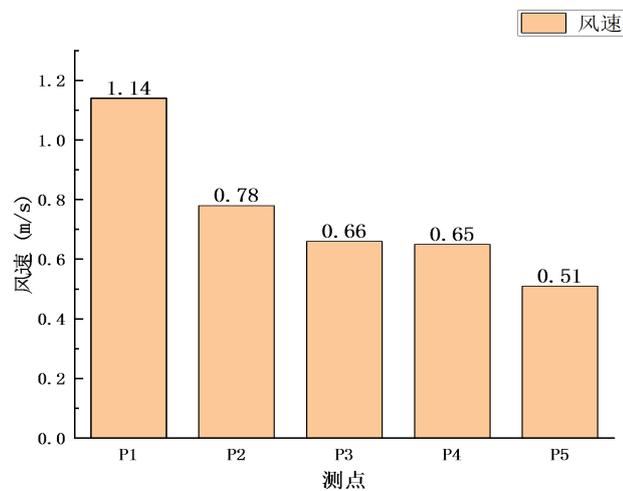


Figure 11. Each measuring point wind speed of air flow path ①

图 11. 风流路径①各测点风速

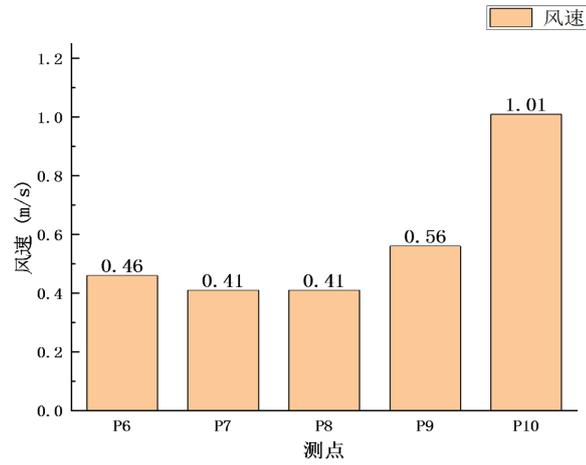


Figure 12. Each measuring point wind speed of air flow path ②
图 12. 风流路径②各测点风速

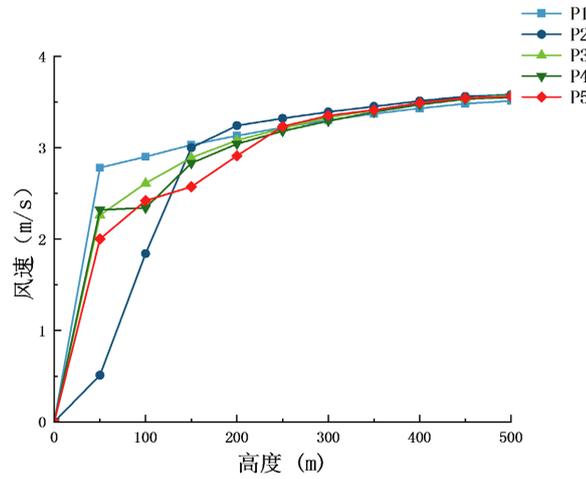


Figure 13. Wind profile at each measuring point of air flow path ①
图 13. 风流路线①各测点风剖面图

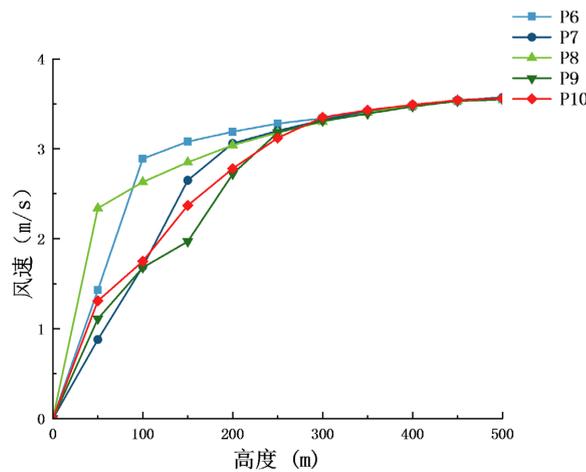


Figure 14. Wind profile at each measuring point of air flow path ②
图 14. 风流路线②各测点风剖面图

风流路径分析可以解释涡流、高速区和低速区等现象。当气流受到地形和建筑物等障碍物的影响时，风速在空间的不同区域产生变化。如果邻近地区的风速变化很大，人们很难适应突然变化的环境；而当风速过低时，不利于空气中污染物的排放，可能会导致建筑物之间空气循环不良，这对室外的通风和温度冷却都有负面影响。大面积的低风速会导致空气中污染物的累积，对居民的身体健康也会有一定的影响。

总体风场情况：1) 由 CFD 风环境模拟可得，整个场地南、北两块区域风速较大，中部风速普遍偏小，静风区较多。2) 各测点沿高度 500 m 上下风速变化不一致，推测原因为建筑群高度不一致。

根据 $z = 1.5 \text{ m}$ 处流场风速模拟数据可知：

(1) 风流路径① (P1~P5)中，P1 点位置附近风速为 1.14 m/s (最大值)，这是因为两侧的山体导致形成了“狭管效应”，当气流通过由地形构成的峡谷时，空气不能过量堆积，因此加速流过峡谷，风速增大，流出峡谷后由于地形开阔，风速减缓，因此 P2 点速度较 P1 点减小，为 0.78 m/s。村落的建筑布局对主导风向北风的气流产生阻挡，导致村落内部形成了大范围静风区，P3、P4 点由于建筑物密集且靠近山脚风速较小，风速为 0.66 m/s 和 0.65 m/s，P5 点风速为 0.51 m/s，居民舒适度较低。

(2) 风流路径② (P6~P10)中，由于建筑区域的东北地区建筑物密集，东北进口处空间小，建筑多，严重阻挡风进入，导致该地区东部形成大量静风区，P6、P7、P8 点位置附近的风速普遍较低，为 0.46 m/s、0.41 m/s、0.41 m/s，建筑群内部通风不畅，导致太阳辐射产生的热量不能及时疏散，直接影响该地区室外舒适度。P9 点风速为 0.56 m/s，P10 点处于无建筑物区域，没有建筑遮挡气流，因此风速较大，为 1.01 m/s。

4. 优化计算

4.1. 优化方案

根据上述 CFD 模拟分析得出，P6、P7、P8 点风速较低，低于 0.50 m/s，为解决该情况，对于三面环山、一面临海、具有区域建筑群的山地丘陵地形布局，根据风流路径分析，提出如下设计优化建议：

- 1) 动态调整设计布局，改变建筑群密度，减少低风速区和高风速区，防止涡流和无自然气流的区域。
- 2) 调整建筑物高宽比，提升建筑区的空气流通能力，减少空气污染，增强居民居住体验。

为满足居民居住环境通风要求，且满足人体舒适度的评价标准，现对黄贤村建筑布局进行优化，整个黄贤村建筑群分布可分为 A、B、C、D 四个板块如图 15，高度分别是 17 m、14 m、11 m、20 m，本文主要采取的优化方法主要是减小 A、C 部分的建筑密度，并且交换两部分建筑高度为 A 部分 11 m，C 部分 17 m。具体模拟方法同前述。



Figure 15. Building layout zoning
图 15. 建筑布局分区

4.2. 模拟结果

建筑布局优化后的风速云图如图 16，各测点风速对比如图 17、图 18 所示。由 CFD 数值模拟结果可以得出：两条风流路径的各测点风速均与优化前相比有所增大，其中影响居民舒适度、风速低于 0.5 m/s 的 P6、P7、P8 点风速分别增大为 1.13 m/s、0.69 m/s、0.81 m/s。由此可以得出该案例区域中过低风速区块减少，居民舒适度提高，风环境整体情况得到改善。

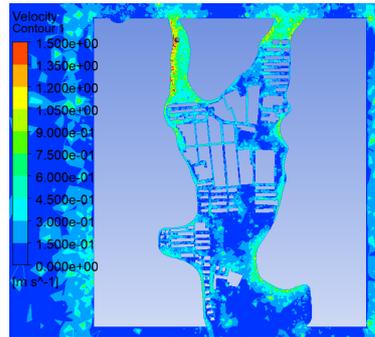


Figure 16. Optimized wind speed cloud map
图 16. 优化后风速云图

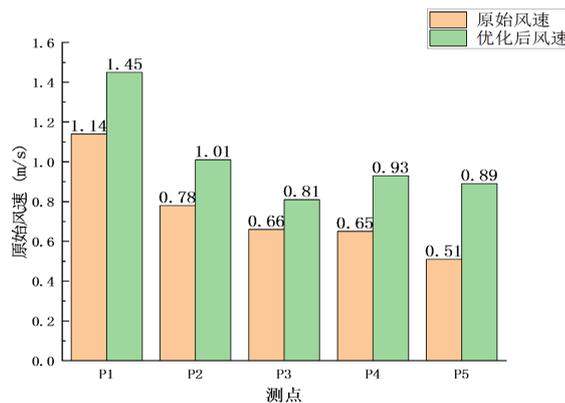


Figure 17. Optimize wind speed comparison front and rear wind speed of air flow path ①
图 17. 风流路径①优化前后风速对比

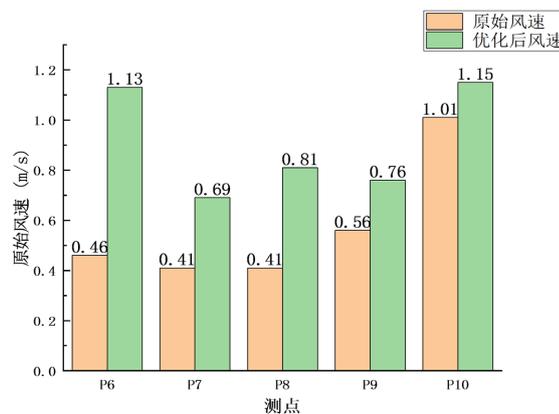


Figure 18. Optimize wind speed comparison front and rear wind speed of air flow path ②
图 18. 风流路径②优化前后风速对比

5. 结论

本文以浙江省宁波市黄贤村为风环境分析对象, 先根据实测数据进行数值模拟, 验证了 CFD 数值模拟进行风环境评估的可行性, 然后采用 CFD 数值模拟与当地气象站所记录的实测风数据资料相结合的方法, 从风流变化路径的视角, 利用 Fluent 软件对案例区域建筑群风环境展开了模拟研究与分析评价。得出该地区风环境现存的问题: 整个区域内室外空气环境较好, 居民体感较为舒适, 但部分区域风速过低, 导致空气循环较弱, 污染物排放不良, 从而影响居民生活质量。本文针对研究案例存在的部分地区风速较低的问题, 进行了改变建筑高宽比, 减小建筑密度的建筑群布局的优化设计, 然后对优化后的模型重新进行 CFD 数值模拟, 得到的模拟结果较之前得到了显著提高。本文提出的风流变化路径分析方法有助于优化山地丘陵地区风环境设计。

基金项目

浙江省基础公益研究计划项目 LGN22E080004。

参考文献

- [1] Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., *et al.* (2008) AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**, 1749-1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- [2] Lee, D.S.-H. (2017) Impacts of Surrounding Building Layers in CFD Wind Simulations. *Energy Procedia*, **122**, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.313>
- [3] Ren, J. (2020) Visual Simulation of Building Wind Environment Based on Computational Fluid Dynamics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **790**, Article ID: 012123. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012123>
- [4] 傅军, 赵牧野, 梁跃安. 基于 CFD 的校区建筑群行人高度风环境分析与评价[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(5): 333-338.
- [5] 姚剑锋, 沈国辉, 姚旦, 邢月龙, 楼文娟. 峡谷和垭口地形风场特征的 CFD 数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 165-171.
- [6] 李磊, 张立杰, 陈柏纬. 基于 CFD 技术的陡峭山体风场模拟方法研究[J]. 气象学报, 2016, 74(4): 613-622.
- [7] 许晖, 张亮. 基于实测风场和 CFD 的城市建筑风能资源模拟评估[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 166-173.
- [8] Gaur, N. and Raj, R. (2022) Aerodynamic Mitigation by Corner Modification on Square Model under Wind Loads Employing CFD and Wind Tunnel. *Ain Shams Engineering Journal*, **13**, Article ID: 101521. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.007>
- [9] Guo, W.H., Liu, X. and Yuan, X. (2015) Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings. *Procedia Engineering*, **121**, 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1036>
- [10] Hou, Y., Li, A. and Mei, S. (2022) Learning from Chinese Traditional Architecture: Field Test and CFD Modelling of Ventilation Enhancement Techniques in Southern Chinese Houses. *International Journal of Ventilation*, **21**, 1-18. <https://doi.org/10.1080/14733315.2021.1876406>
- [11] 肖仪清, 李朝, 欧进萍, 宋丽莉, 李秋胜. 复杂地形风能评估的 CFD 方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 30-35.
- [12] 刘滨谊, 司润泽. 基于数据实测与 CFD 模拟的住区风环境景观适应性策略——以同济大学彰武路宿舍区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(2): 24-28.
- [13] 吴强, 傅军, 徐煜佳, 李洁, 潘云锋. 典型沿海丘陵地区风场变化特性实测研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(4): 25-29+72.
- [14] 傅军, 李洁, 吴强. 激光测风雷达在风场观测领域的应用及展望[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(4): 172-179.
- [15] 唐昂, 傅军, 施红辉, 董若凌. 基于实际峡谷地形风场数值模拟的建筑微观选址[J]. 浙江理工大学学报, 2015, 33(5): 423-428.
- [16] 冯林, 傅军, 施红辉, 董若凌, 章利特. 山体地形中粗糙度对风速的影响研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12):

3577-3583.

- [17] 冯林, 傅军, 郑刚兵, 施红辉, 董若凌. 实际复杂山地地形下建筑选址与布局研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 305-310.