

# 基于流体力学的城市空间风热环境研究评述

王昭芳

北京工业大学建筑工程学院, 北京

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月12日; 发布日期: 2025年3月26日

## 摘要

随着城市化的加快, 城市人口的增多, 城市内部产生人为热过量释放、空气污染、城市热岛效应等环境问题, 城市空间风热环境逐渐恶化。因此, 以流体力学为理论基础学科发展起来的的城市空间风热环境的研究逐步增多。大量城市空间风热环境的研究都以流体力学为研究理论基础, 因此, 本文意在梳理流体力学在城市空间风热环境研究领域的应用过程与方式。首先, 本文对城市空间风热环境研究中运用流体力学的原因进行简要分析。其次, 本文对空气无穷小流体元在拉格朗日坐标系下x轴方向的受力进行了深入分析, 从无穷小流体元与周围流体的速度关系出发, 说明其受每个力的具体原因, y、z两个方向的受力同理。之后, 推导了无穷小流体元在拉格朗日坐标系下的质量守恒、动量守恒与能量守恒方程。然后, 本文对城市空间风热环境研究中的边界层与空气流体的流动状态进行了简要评述, 包含边界层厚度的确定方法以及湍流模型的优缺点和选取方法。最后, 将青岛理工大学嘉陵江东路校区北部宿舍生活区(以下均称北区宿舍)作为城市空间风热环境的研究应用实例, 运用计算流体力学软件ANSYS进行计算流体力学模拟, 仿真其风热环境, 得到了北区宿舍风速场、温度场与风压场。

## 关键词

城市空间风热环境, 计算流体力学, 仿真模拟

# Review on the Study of Urban Spatial Wind and Thermal Environment Based on Fluid Mechanics

Zhaofang Wang

College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: Feb. 10<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 12<sup>th</sup>, 2025; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

With the acceleration of urbanization and the increase of urban population, environmental issues such as excessive anthropogenic heat release, air pollution, and urban heat island effects have emerged within cities, leading to the gradual deterioration of urban wind-thermal environments. Consequently, research on urban wind-thermal environments, developed based on fluid mechanics as the theoretical foundation, has progressively increased. Since a significant body of studies on urban wind-thermal environments relies on fluid mechanics as their theoretical basis, this paper aims to systematize the application processes and methodologies of fluid mechanics in this research domain. First, this paper briefly analyzes the rationale for employing fluid mechanics in urban wind-thermal environment studies. Second, it conducts an in-depth analysis of the forces acting on an infinitesimal air fluid element along the x-axis in a Lagrangian coordinate system, explaining the specific causes of each force based on the velocity relationship between the element and its surrounding fluid. Similar analyses apply to the y- and z-axis directions. Subsequently, the mass conservation, momentum conservation, and energy conservation equations for the infinitesimal fluid element in the Lagrangian framework are derived. The paper then provides a concise review of boundary layers and airflow states in urban wind-thermal environment research, including methods for determining boundary layer thickness, as well as the advantages, limitations, and selection criteria of turbulence models. Finally, the Northern District Dormitory Area of Qingdao University of Technology's Jialingjiang East Road Campus (hereafter referred to as the Northern Dormitory Area) is examined as a case study. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are performed using ANSYS software to model the wind-thermal environment, yielding detailed wind speed fields, temperature fields, and wind pressure fields for the Northern Dormitory Area.

## Keywords

Urban Wind-Thermal Environment, Computational Fluid Dynamics, Simulation

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

流体力学作为力学的一门分支学科,主要研究液体、气体的受力与运动。随着现代科学的高速发展,其逐渐应用于环境、航空、暖通、土建、水利等工程领域,而本文主要深入介绍流体力学在城市空间风热环境这个研究方向的应用。

随着城市化的不断加快,城市空气污染加重,城市整体温度提升出现城市热岛效应,城市空间风热环境逐渐恶化。因此,大量城市空间风热环境的缓解措施被学者们提出,例如规划城市建筑布局、水体设置规划、植被布局规划、通风走廊规划等。其中,城市建筑布局规划需充分了解不同形状与布局的城市建筑周围的气流流动特征与温度分布情况,如,Qaid A.与 Ossen D.R. (2015)分析了不对称街道的高宽比对建筑峡谷中风环境的影响,发现适当的建筑高宽比可以有效缓解热岛效应,并能有效地改善城市街区的局部物理环境[1]; Allegrini J.和 Lopez B. (2016)运用风洞实验对建筑风道模型进行了研究,探究板式建筑物的夹角对室外风速的影响机理,详细分析了不同室外风速区形成的具体原因[2]; Xu 等(2017)建立了四十种形状不同的单体高层建筑模型,探究了建筑形状对行人高度风环境的影响机理[3]。植被布局规划也需充分了解不同品种、不同布局形状特征植被周围的气流特征与温度分布,如,Li 等(2011)通过探究

归一化植被指数、植被分数和不透水表面积百分比与地表温度(LST)的关系,并具体分析景观组成和配置怎样影响中国上海的 UHI,结果表明城市景观结构也会影响地表 UHI [4]; B. Vidrih, S. Medved (2013)研究了城市公园对建筑环境中热岛效应的缓解,考虑到公园草地覆盖、树木密度和年龄,根据全天准稳态热响应,在根区最佳土壤水分条件下,在不同风速下,确定选定极端夏季的公园冷却岛(PCI)效应[5]。通风走廊规划需充分了解城市整体空气流动趋势,如,沈娟君(2018)为了更好的指导晋江市的城市布局规划,其还运用 GIS 技术完成了晋江城区各区域通风潜力的评估[6]; 尹杰(2019)以武汉市作为研究对象,通过对街道与风向的夹角进行打分、建立街道长度衰减系数,建立了综合评判各级道路的综合通风潜力的公式,完成了通风潜力的量化,有效实现了武汉市各城区通风潜力的评估工作[7]。

以上这些研究都要求学者们致力于城市空间内空气流体的速度场、温度场等的充分了解与掌握,因此,流体力学作为基础理论工具被应用到城市空间风热环境的研究领域。之后,随着计算机技术的发展,计算流体力学以其能够数值求解流体力学方程从而能够得到城市空间内空气的速度场与温度场而被广泛应用。此外,当前研究多聚焦单一要素(如建筑布局或植被)对风热环境的孤立影响,缺乏多要素耦合作用下的系统性分析;现有成果多依赖简化模型或稳态假设,难以捕捉真实城市环境的动态复杂性。

近年来,计算流体力学(CFD)在城市风热环境研究中的应用不断深化,研究焦点逐步从单一物理场分析转向多技术融合与动态耦合模拟。本文将从模型加速与高效计算、多模型耦合与动态模拟、城市规划与综合技术应用三个维度综述国内外研究现状,并提炼发展趋势与挑战。

针对模型加速与高效计算,传统 CFD 模拟因计算成本高昂难以满足大规模城市问题的实时需求,深度学习与新型数值方法的引入成为近年关键突破。Peng 等(2024) [8]提出基于傅里叶神经算子(FNO)的三维动态城市微气候实时模拟框架,通过结合 CFD 生成训练数据,在 GPU 上实现毫秒级预测,为城市风场实时评估提供了新范式。类似地,You 等(2024) [9]利用 U-net 深度学习模型替代传统 CFD,将建筑风环境预测时间缩短至原方法的 1/900,同时保持高精度,为快速优化建筑布局提供了高效工具。这些研究表明,数据驱动方法(如 FNO、GAN)正逐步打破 CFD 的计算瓶颈,但模型泛化能力与复杂场景适应性仍需进一步验证。

针对多模型耦合与动态模拟,多物理场耦合与动态气象条件集成是提升模拟真实性的核心方向。早期研究如 Zheng 等(2015) [10]通过 WRF-CFD 耦合模型分析沈阳建成区的流动与污染物扩散,揭示了大气边界层结构对污染分布的决定性作用,但受限于计算资源未能实现动态交互。Allegrini 和 Carmeliet (2017) [11]进一步将 CFD 与建筑能耗模拟结合,量化建筑高度拓扑对局部热岛的影响,发现浮力效应显著改变空气温度分布,为城市微气候调控提供了理论依据。近年来,研究逐步向实时动态模拟迈进,例如通过 FNO 实现瞬态风场预测[8],但多场耦合(如风-热-污染物)的动态交互机制仍需深入探索。

针对城市规划与综合技术应用,CFD 与 GIS、RS 等空间分析技术的整合为城市规划提供了科学支撑。Chang 等(2018) [12]在长春市利用 CFD-GIS 耦合技术识别潜在通风廊道,结合风场数据优化城市布局,验证了技术整合对缓解热岛效应的有效性。Wu 和 Shan (2024) [13]进一步扩展至 RS-GIS-CFD 综合框架,以驻马店市为例,提出基于景观分析与流体模拟的城市风廊道规划方法,指出既有建筑布局可能形成通风屏障,需通过土地用途调整优化风环境。这些研究凸显了跨学科技术融合的实践价值,但如何平衡精细化模拟与城市规划的宏观需求仍是难点。

当前研究呈现三大趋势,即从孤立到协同,CFD 与深度学习、气象模型、GIS 的深度整合成为主流;从静态到动态,实时数据驱动与多物理场瞬态耦合模拟逐步取代传统稳态分析;从理论到实践,研究成果向城市规划、灾害防控等实际场景加速转化。然而,现有研究仍面临以下挑战。第一,计算效率与精度的平衡,尽管深度学习大幅加速 CFD,但其在复杂城市形态(如高密度建筑群)中的泛化能力不足。第二,极端气候应对的缺失,多数研究聚焦常态气候,缺乏对寒冷地区强风-低温耦合效应的系统性分析。

第三，跨尺度交互的简化，城市冠层与大气边界层的多尺度作用机制尚未充分建模，限制模拟真实性。

本文将从流体力学基本方程的理论深度出发，结合边界层理论与湍流模型，介绍空气流体的受力、三大控制方程、流动状态与边界层方面的理论，建立多物理场耦合分析框架，在方法改进上，采用高精度 CFD 模拟技术，通过边界条件设置与精细化网格划分，提升复杂城市形态下的模拟可信度，最后将其应用到城市空间风热环境中，以高密度校园宿舍区为案例，运用计算流体力学(CFD)技术模拟仿真青岛某高校宿舍区的风热环境，探索寒冷季节极端风热环境的缓解策略，填补现有研究对特殊气候场景的关注空白。

## 2. 城市空间内空气流体的受力与三大控制方程

### 2.1. 空气流体受力分析

在城市空间风热环境的研究领域，空气是被研究的流体。其受力情况与流体力学中研究的流体受力情况是类似的。本节便对空气流体的受力情况进行简要分析。

众所周知，研究流体的运动情况，必须指定参考系与研究主体。流体力学中的参考系为欧拉参考系与拉格朗日参考系，其中，欧拉参考系是着眼于空间点，在空间的每一点上描述流体运动随时间的变化，拉格朗日参考系是着眼于流体质点，描述每个流体质点自始至终随时间变化的运动。而流体力学中的研究主体为有限控制体与无穷小流体元。有限控制体是具有封闭表面的一块体积，若此块体积空间固定且其内部包含的质点随时间变化，则此块体积用于欧拉参考系下；若此块体积内流体质点固定，且随时间变化而位置变化，该有限控制体则用于拉格朗日参考系下。无穷小流体元是流体区域内的一个体积微元，同样，若该体积微元随时间变化位置不变而内部的流体质点变化，则用于欧拉参考系；该体积微元若随时间变化而位置变化，则用于拉格朗日参考系。

本文为便于读者理解流体的运动，选择随时间变化位置变化但内部质点不变的无穷小流体元作为研究主体，在拉格朗日参考系下分析其受力情况。该无穷小运动流体元的  $x$  方向受力图如下图 1 [14]：

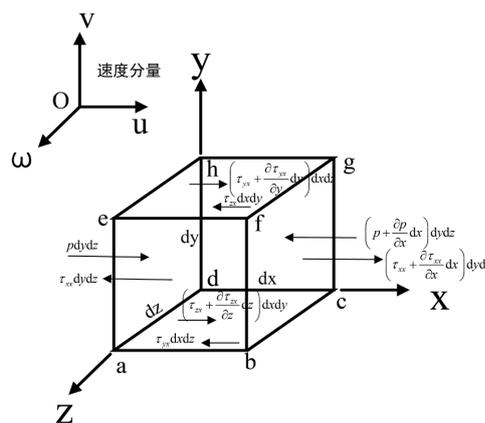


Figure 1.  $x$ -direction force diagram of infinitesimal moving fluid element

图 1. 无穷小运动流体元的  $x$  方向受力图

将流体域中该无穷小六面体流体元周围流体对其作用力分为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向，本文只分析在  $x$  轴方向的受力情况， $y$ 、 $z$  方向同理。

受力分析之前，首先明确流体速度在  $x$  轴方向的分量是沿  $x$  轴正方向的，流体速度在  $y$  轴方向的分

量是沿  $y$  轴正方向的，流体速度在  $z$  轴方向的分量是沿  $z$  轴正方向的。也就是说，图 1 中紧贴  $bcbf$  面右侧的流体  $u$  值大于  $bcbf$  面上的流体  $u$  值，紧贴  $adhe$  面左侧的流体  $u$  值小于  $adhe$  面上的流体  $u$  值；紧贴  $efgh$  面上侧的流体  $v$  值大于  $efgh$  面上的流体  $v$  值，紧贴  $abcd$  面下侧的流体  $v$  值小于  $abcd$  面上的流体  $v$  值；紧贴  $abfe$  面前侧的流体  $w$  值大于  $abfe$  面上的流体  $w$  值；紧贴  $dcgh$  面后侧的流体  $w$  值小于  $dcgh$  面上的流体  $w$  值。

从上述分析的无穷小六面体流体元周围流体速度与其本身速度的关系可知，六面体下侧的流体速度小从而产生了阻碍六面体向  $x$  轴正方向运动的  $\tau_{yx} dx dz$ ，六面体上侧的流体速度大从而产生了牵引六面体向  $x$  轴正方向运动的  $\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy\right) dx dz$ ；六面体后侧的流体速度小从而产生了阻碍六面体向  $x$  轴正方向运动的  $\tau_{zx} dx dy$ ，六面体前侧的流体速度大从而产生了牵引六面体向  $x$  轴正方向运动的  $\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz\right) dx dy$ ；六面体左侧的流体速度小从而产生了阻碍六面体向  $x$  轴正方向运动的粘性阻力  $\tau_{xx} dy dz$ ，同时六面体左侧的流体会对六面体产生挤压力  $p dy dz$  指向六面体内侧；六面体右侧的流体速度大从而产生了牵引六面体向  $x$  轴正方向运动的  $\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx\right) dy dz$ ，同时六面体右侧的流体会对六面体产生挤压力  $\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) dy dz$  指向六面体内侧。剩下的  $y$ 、 $z$  方向受力分析同理。

### 2.2. 流体力学三大控制方程

上文已经分析了在拉格朗日坐标系下的无穷小流体元模型的受力情况，接下来，本文便对拉格朗日坐标系下的无穷小流体元模型的三大守恒方程进行分析。

流体的运动遵循物理守恒定律，这些守恒定律是建立流体力学控制方程组的依据。这些物理守恒定律分别是质量守恒、动量守恒和能量守恒定律。

#### (1) 质量守恒

质量守恒定律的具体的数学描述就是质量守恒方程，在流体力学领域也被称为连续性方程，对于随时间变化位置变化的无穷小流体元而言，其内部质点总是不变的，因此其质量是固定的，但其体积却是变化的。因此，质量守恒可具体表述为：流体元随流体一起运动时其质量随时间的变化率为零[14]。该表述的数学表达为：

$$\frac{D(\delta m)}{Dt} = 0 \tag{1}$$

$$\delta m = \rho \delta v \tag{2}$$

其中  $\delta m$  与  $\delta v$  分别代表固定质量与可变体积，将(2)代入(1)，并展开物质导数，最后得：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

式(3)即为连续性方程，式中， $\rho$  表示密度； $t$  是时间； $u$ ， $v$ ， $w$  是  $x$ ， $y$ ， $z$  方向上的速度矢量。

#### (2) 动量守恒

动量守恒是指微元体中的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体的力的总和[15]。随时间变化位置变化的无穷小流体元使用牛顿第二定律( $F = ma$ )进行动量方程的推导是最适合的。

为节省篇幅，本文只对  $x$  轴方向的动量方程进行推导，其它两个方向同理。

对于  $x$  轴方向来说，牛顿第二定律可表示为  $F_x = ma_x$ ，其中  $F_x$  由表面力与体积力组成，表面力根据

受力分析图 1 可得, 为  $\left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right] dx dy dz$ , 而体积力可表示为  $\rho g_x dx dy dz$ , 其中  $g_x$  为单位质量体积力在  $x$  轴方向分量, 因此  $F_x$  可表示为:

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right] dx dy dz + \rho g_x dx dy dz \quad (4)$$

无穷小流体元质量可表示为:

$$m = \rho dx dy dz \quad (5)$$

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (6)$$

综合(4)~(6)并展开物质导数并推导, 得到  $x$  轴方向的动量守恒方程为式(7)。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ & = T_x + \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + R_x + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

$y$ 、 $z$  两个方向的动量守恒方程同理, 结果如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ & = T_y + \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + R_y + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\ & = T_z + \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + R_z + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\mu_e \frac{\partial w}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\rho$  是流体密度;  $\mu_e$  是有效粘度;  $R_x, R_y, R_z$  是分布式阻力;  $T_x, T_y, T_z$  是粘性损失项。

### (3) 能量守恒

能量守恒是指无穷小流体元中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功[1]。根据定律的描述进行推导得能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho C_p T_0)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x C_p T_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y C_p T_0)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z C_p T_0)}{\partial z} \\ & = W^v + E^k + \frac{\partial p}{\partial t} + Q_v + \varphi + \frac{\partial\left(k \frac{\partial T_0}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(k \frac{\partial T_0}{\partial y}\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(k \frac{\partial T_0}{\partial z}\right)}{\partial z} \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $C_p$  是比热容;  $T_0$  是总温度(停滞温度);  $k$  是导热系数;  $W^v$  是粘性功;  $Q_v$  是体积热源;  $E^k$  是动能;  $\varphi$  是粘性生热项。

### 3. 城市空间内空气流体的边界层与流动状态

#### 3.1. 城市空间内空气流体的边界层

粘性流体绕流物体时,由于粘性的作用,在物体的表面附近,存在速度急剧变化的薄层便是边界层。在城市空间风热环境研究领域,边界层便是靠近地表、建筑物外表面的速度梯度很大的薄层[16]。

那么,这个边界层薄层到底多厚呢?通常,取壁面到沿壁面外法线上速度达到势流区速度的99%处的距离作为边界层的厚度[17]。但在城市空间风热环境的研究领域中,城市内部非常复杂,城市形态多种多样,边界层的厚度通常无法计算。但对于一项实际的城市空间风热环境的研究实例来说,边界层的生成是一项至关重要的事情,这是由于CFD模拟城市空间风热环境时,模拟尺度非常大从而导致划分的网格也会比较大,大的网格尺寸可能导致城市中某些重点关注的地区与地点不能被突出细节。因此,在城市空间风热环境的CFD模拟中必须沿着各种壁面生成一定厚度的边界层,从而能够准确捕捉到壁面附近的细节。而边界层的厚度通常是根据模拟的实际情况进行估算,比如,在一项关于行人高度风速情况的研究中,行人高度的风速是重点关注内容,因此,生成的边界层厚度至少要为行人高度。

#### 3.2. 城市空间内空气流体的流动状态

流体的流动状态有两种,层流和湍流。层流是指流体在流动过程中是分层的,两层之间没有相互混掺,而湍流是指流体不是处于分层流动状态[18]。

层流湍流的判断标准为雷诺数(Re)是否超过临界雷诺数。一般来说,自然界中湍流是普遍的,而层流属于个别情况。城市形态复杂多样,则城市内的空气流动自然也是复杂多变,因此,城市空间风热环境中的空气流体流动状态以湍流为主,层流较少出现。

用于城市空间风热环境的计算流体力学(CFD)模拟会用到各种各样的湍流模型,各类湍流模型各有优缺点,分别适用于不同实际研究情况的风热环境模拟。现今主流的湍流模型如下图2。



Figure 2. Mainstream turbulence model

图2. 主流的湍流模型

在城市空间风热环境的CFD模拟中,湍流模型的选取取决于许多因素,如拥有的计算机计算资源、模拟所需时间、相关类型问题以往的经验、计算精度的要求、流动的物理机理等等。

各个湍流数值模拟方法都有各自优缺点:

零方程模型的计算精度有限,属于较低级的湍流模型,但在简单问题中却能够极大节约计算机计算资源,缩短计算时间,因此适合比较简单的流动[19]。

单方程模型是针对大网格的低成本湍流模型,适用于模拟导弹、船体、螺旋桨、机身和翼型等等

复杂的内流、外流以及有压力梯度下的边界层流动。

标准  $k-\varepsilon$  模型的优点和缺点都非常明显。其系统的健壮性强,在异常和危险情况(如计算机磁盘故障、网络过载或有意攻击等情况)下系统能够不死机、不崩溃,稳定生存,即鲁棒性最好。适用于初始迭代和参数研究等[19]。

Realizable  $k-\varepsilon$  模型与 RNG  $k-\varepsilon$  性能基本类似,都比较适用于室内通风、边界层分离、块状分离、涡的后台阶分离等涉及快速应变、中等涡流、局部转捩的复杂剪切流动[5]。但 Realizable  $k-\varepsilon$  模型的计算精度优于 RNG  $k-\varepsilon$  模型[19]。

雷诺应力模型是依据雷诺时均的湍流模型,可有效避免各向同性涡粘假设,需要更多的计算时间和内存消耗,因此通常只有强旋转流和涡的复杂三维流动才用此模型[19]。

大涡模拟模型常用于模拟瞬态的大尺度涡,并通常伴随 F-W-H 噪声模型联合使用[19]。

## 4. 城市空间风热环境研究应用与实例

前文介绍了流体力学在城市空间风热环境领域的理论,本章节将使用研究实例对流体力学在城市空间风热环境的应用进行具体展示。

### 4.1. 研究实例简述

青岛理工大学嘉陵江路校区地处青岛市黄岛区,其北部宿舍生活区都为高层建筑,且北部临海,不当的建筑布局使得其寒冷月份风环境极差,易出现极端寒冷以及极大风速天气状况,根据 2019 年 7 月统计的青岛的历年气象数据,青岛地区每年 12 月、1 月、2 月的月平均温度较低,分别为  $1.7^{\circ}\text{C}$ 、 $-1.2^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,同时,12 月、1 月、2 月的平均风速大于年平均风速  $5.3\text{ m/s}$ ,且出现的月最大风速都大于  $25\text{ m/s}$ ,风速过大导致风压变大,出现极端恶劣天气,极易出现高空坠物等危险现象。因此,改善青岛地区 12 月、1 月、2 月的风环境可极大改善城市居民的生活环境。

因此,本章选用青岛理工大学嘉陵江东路校区北部宿舍生活区(以下均称北区宿舍)作为研究的应用实例,分析其建筑布局和形状对建筑空间风环境的影响机理,通过 CFD 模拟来深入了解其风热环境情况,从而为寻求解决办法提供理论指导。

首先建立北区宿舍建筑信息模型,根据青岛理工大学嘉陵江东路校区北部宿舍生活区的全部图纸,运用 revit2018 软件进行北区宿舍建筑信息模型的建立。本次建模主要目的是导入 ANSYS 系列软件中进行北区宿舍风热环境的 CFD 模拟仿真,太多建筑细节会大大影响 ANSYS 计算网格的划分,并将大大提高 fluent 的计算成本,因此本次建模为简单建模,并未对建筑材料、钢筋信息、装修信息等进行建模,但却找到了建模详细程度与 ANSYS 模拟仿真之间的平衡,建成模型如下图 3 所示:

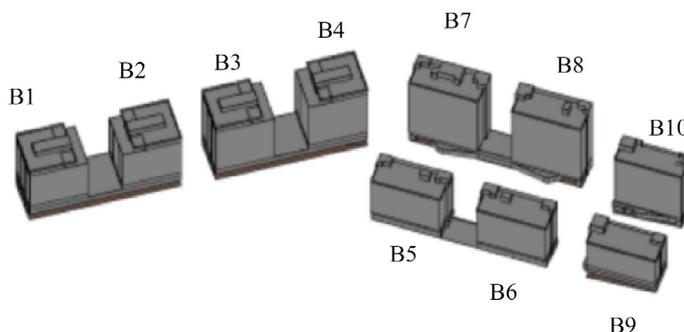


Figure 3. North District dormitory revit model  
图 3. 北区宿舍 revit 模型图

## 4.2. 北区宿舍风热环境仿真模拟

### 4.2.1. 北区宿舍气象数据与流体域尺寸的确定

#### (1) 气象数据

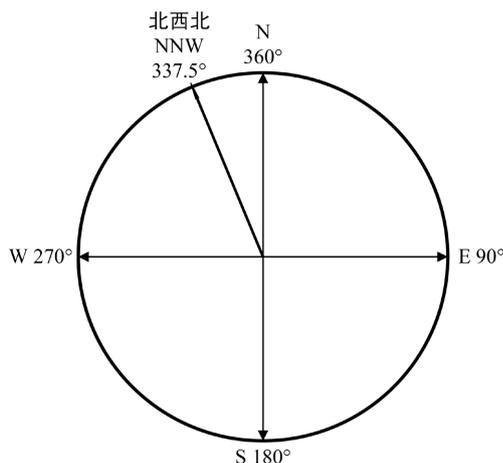
对于气象数据,北区宿舍地处青岛,因此其物理与气象数据根据2019年7月统计的青岛历年气象数据,数据如下表1:

**Table 1.** Meteorological data

**表 1.** 气象数据

寒冷月份平均气温	寒冷月份 0.00 米处地温	寒冷月份月最大风速	寒冷月份建筑外表面壁温
0.2℃	1.3℃	26.9 m/s	2.1℃

对于风向,参考青岛气象统计数据,数据显示,本文针对的寒冷月份12月、1月、2月,此三月的主导风向分别为NNW、NNW、NNNW,因此本文确定寒冷月份的风向为NNW。风向图如下图4:



**Figure 4.** Wind direction chart

**图 4.** 风向图

#### (2) 流体域尺寸

北区宿舍一共包括10栋楼,分别为B1~B10,取这10栋楼中高度最高的B7楼的建筑高度作为此群体建筑的高度,即 $H = 60$ 米。根据前面两章确定流体域尺寸的原则,本章将风入口距离建筑设为 $5H = 300$ 米,出口距离建筑背面 $15H = 900$ 米,流域高度设为 $10H = 600$ 米,建筑侧面距流域边界 $10H = 600$ 米。

### 4.2.2. 北区 revit 模型的几何修复

首先,模型导出与格式转换。将北区宿舍revit三维模型导出成SAT(ACIS)格式文件,利用ANSYS SCDM(SpaceClaim Direct Modeler)导入并检查几何完整性。

其次,几何清理。用SPACECLAIM进行北区宿舍模型的几何修复,删除门窗、装饰构件等对流动无显著影响的细节,合并碎片化表面(如墙体外立面),确保建筑实体封闭。简单来说,此步骤是将北区宿舍模型中对流体仿真模拟无关的几何特征进行去除。并运用软件中的草绘功能、拉动功能与组合功能等将建筑内部空间填充成实体,即把碎片化的墙、板等构件修复成一个实体,最后所有几何构件修复成10栋建筑对应的10个实体。

最后, 流体域生成。根据前文确定的北区宿舍流体域尺寸, 基于“10H 原则”构建外流场(入口  $5H=300\text{ m}$ , 出口  $15H=900\text{ m}$ , 高度  $10H=600\text{ m}$ ), 使用 SCDM 的“外壳(Enclosure)”功能自动生成非结构化流体域, 并与建筑实体进行布尔减运算, 形成最终计算区域, 即北区宿舍的外流体域。

#### 4.2.3. 网格划分

完成北区宿舍外流体域的创建之后便需要对外流体区域进行网格划分, 以便离散化流体域求出流体域风速场、温度场、压力场等数据。

首先, 全局网格设置。采用四面体网格, 基础尺寸设为  $10\text{ m}$ , 近壁面区域加密至  $0.5\text{ m}$ 。

其次, 边界层生成。在建筑表面与地面设置 5 层边界层网格, 增长因子 1.2, 总厚度  $\geq 1.5\text{ m}$  (行人高度), 满足近壁面  $y^+ < 5$  的湍流模型要求。

然后, 局部加密。在建筑间隙、入口通道及重点关注区域(B2~B3、B4~B7 等)实施局部加密, 网格尺寸缩减至  $0.25\text{ m}$ 。

最后, 质量校验。通过 ANSYS Meshing 检查网格正交性(Skewness  $< 0.85$ ), 最终网格总量为 170 万。

由于北区宿舍工程实例很复杂, 需要划更多网格进行流体域离散, 但与此同时, 网格的增多意味着需要更多的计算机计算内存与时间。本文为了找到网格数量与计算资源的平衡, 多次划分网格。第一次, 划分了 400 万网格, 但此时计算机计算能力不够无法计算出结果; 第二次, 划分了 170 万网格, 并且网格倾斜度与精细程度符合要求, 同时计算机计算能力足够计算 170 万网格, 可以计算。

#### 4.2.4. FLUENT 仿真模拟

本章仍然采用压力基求解器, 稳态计算, 输入重力加速度  $9.8\text{ m/s}$ , 打开能量方程, 设置湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  两方程模型。具体边界条件与求解设置如下。

入口边界: 设为速度入口(Velocity Inlet), 风速  $26.9\text{ m/s}$  (基于青岛气象台 50 年重现期极值), 湍流强度 5%, 温度  $0.2^\circ\text{C}$  (寒冷月均值)。

出口边界: 设为压力出口(Pressure Outlet), 静压  $0\text{ Pa}$ , 回流温度  $0.2^\circ\text{C}$ 。

壁面条件: 地面与建筑表面设为无滑移壁面, 地面温度  $1.3^\circ\text{C}$  (地温实测值), 建筑表面温度  $2.1^\circ\text{C}$ 。

求解器配置: 采用压力基稳态求解器, 耦合算法(Coupled Scheme), 湍流模型为标准  $k-\varepsilon$  (增强壁面函数), 能量方程启用, 收敛残差设为  $1e-4$ 。

### 4.3. 北区宿舍模拟结果分析

以下为 fluent 仿真模拟出的北区宿舍行人高度  $1.5\text{ m}$  处的风速云图、气温云图与风压云图(图 5~7):

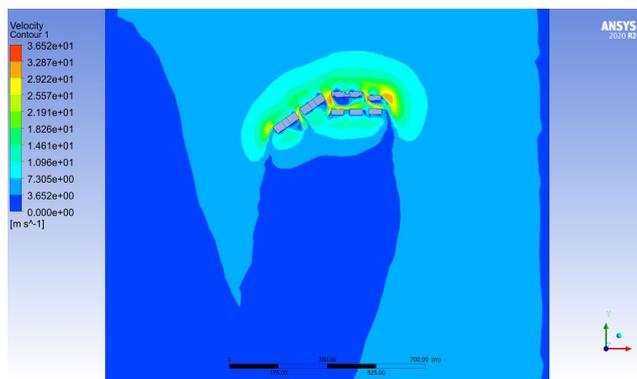


Figure 5. Wind speed cloud picture of North District Hostel at 1.5 m pedestrian height

图 5. 北区宿舍于 1.5 m 行人高度风速云图

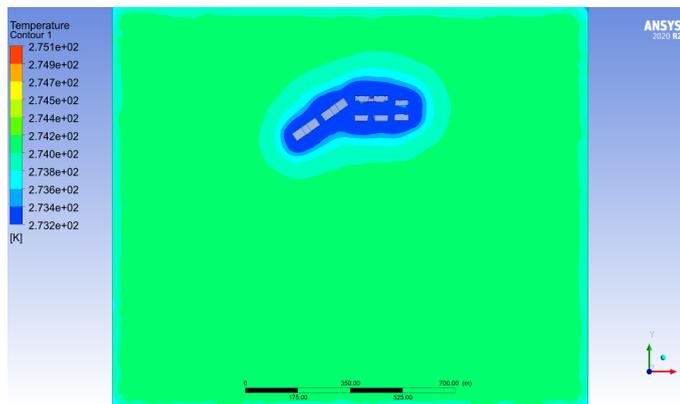


Figure 6. Temperature cloud picture of North District Hostel at 1.5 m pedestrian height

图 6. 北区宿舍于 1.5m 行人高度气温云图

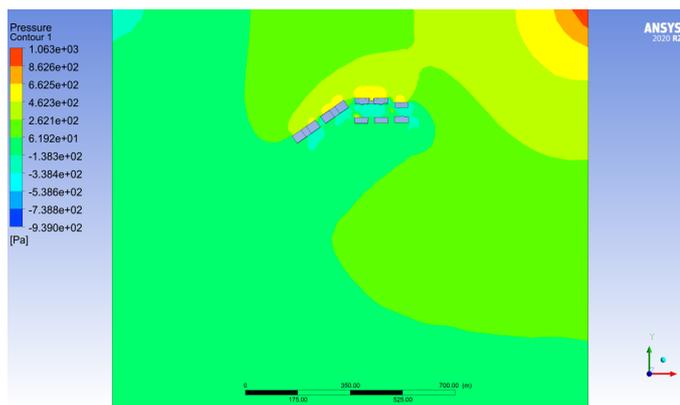


Figure 7. Wind pressure cloud picture of North District Hostel at 1.5 m pedestrian height

图 7. 北区宿舍于 1.5 m 行人高度风压云图

从此风速云图可以观察出，风速较大区主要有 5 个区域：第一个区域为 B2 公寓与 B3 公寓组成的建筑通道；第二个区域为 B4 与 B7 组成的建筑间通道；第三个区域为 B8 与 B10 组成的建筑间通道；第四个区域为 B10 的东北角；第五个区域为 B5 与 B9 的北侧。

对北区宿舍的风热环境有了整体了解后，便于寻找缓解北区宿舍风热环境的措施。

## 5. 结论

本文从城市空间风热环境研究的角度出发，以空气流体为评述对象，描述了流体力学的几大理论，包括流体受力分析、三大控制方程推导、边界层理论、层流湍流理论。然后展示流体力学在城市空间风热环境研究领域的具体实例应用——青岛理工大学北区宿舍区室外空间风热环境的模拟。

现今城市空间风热环境研究领域中对流体力学的利用偏向于表象，此领域大量学者只是会运用计算流体力学软件模拟仿真风热环境，对模拟背后的理论理解与运用并不深刻，因此，在未来研究中，学者们应加强对流体力学理论的深入运用。

## 致 谢

本文的完成离不开诸多老师、同学、同事及家人的支持与帮助，在此谨致以诚挚的感谢。

## 参考文献

- [1] Qaid, A. and Ossen, D.R. (2014) Effect of Asymmetrical Street Aspect Ratios on Microclimates in Hot, Humid Regions. *International Journal of Biometeorology*, **59**, 657-677. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>
- [2] Allegrini, J. and Lopez, B. (2016) The Influence of Angular Configuration of Two Buildings on the Local Wind Climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **156**, 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.008>
- [3] Xu, X., Yang, Q., Yoshida, A. and Tamura, Y. (2017) Characteristics of Pedestrian-Level Wind around Super-Tall Buildings with Various Configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **166**, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.03.013>
- [4] Li, J., Song, C., Cao, L., Zhu, F., Meng, X. and Wu, J. (2011) Impacts of Landscape Structure on Surface Urban Heat Islands: A Case Study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 3249-3263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.008>
- [5] Vidrih, B. and Medved, S. (2013) Multiparametric Model of Urban Park Cooling Island. *Urban Forestry & Urban Greening*, **12**, 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.01.002>
- [6] 沈娟君. 基于 CFD 的城市通风廊道优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [7] 尹杰, 詹庆明. 基于 GIS 和 CFD 的城市街道通风廊道研究——以武汉为例[J]. 中国园林, 2019, 35(6): 84-88.
- [8] Peng, W., Qin, S., Yang, S., Wang, J., Liu, X. and Wang, L. (2024) Fourier Neural Operator for Real-Time Simulation of 3D Dynamic Urban Microclimate. *Building and Environment*, **248**, Article ID: 111063. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111063>
- [9] You, Y., Yu, F. and Mao, N. (2024) Fast Prediction and Optimization of Building Wind Environment Using CFD and Deep Learning Method. *Applied Sciences*, **14**, Article No. 4087. <https://doi.org/10.3390/app14104087>
- [10] Zheng, Y., Miao, Y., Liu, S., Chen, B., Zheng, H. and Wang, S. (2015) Simulating Flow and Dispersion by Using WRF-CFD Coupled Model in a Built-Up Area of Shenyang, China. *Advances in Meteorology*, **2015**, Article ID: 528618. <https://doi.org/10.1155/2015/528618>
- [11] Allegrini, J. and Carmeliet, J. (2017) Coupled CFD and Building Energy Simulations for Studying the Impacts of Building Height Topology and Buoyancy on Local Urban Microclimates. *Urban Climate*, **21**, 278-305. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.005>
- [12] Chang, S., Jiang, Q. and Zhao, Y. (2018) Integrating CFD and GIS into the Development of Urban Ventilation Corridors: A Case Study in Changchun City, China. *Sustainability*, **10**, Article No. 1814. <https://doi.org/10.3390/su10061814>
- [13] Wu, K. and Shan, L. (2024) Make Way for the Wind—Promoting Urban Wind Corridor Planning by Integrating RS, GIS, and CFD in Urban Planning and Design to Mitigate the Heat Island Effect. *Atmosphere*, **15**, Article No. 257. <https://doi.org/10.3390/atmos15030257>
- [14] 姚朝晖, 周强. 计算流体力学入门[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [15] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [16] 李野. 边界层内层问题的稳定和高效的数值方法[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [17] 樊洪明, 刁彦华. 高等流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [18] 王翠云. 基于遥感和 CFD 技术的城市热环境分析与模拟[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [19] 齐静. 基于 CFD 风热环境模拟的小区规划方案研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2010.