

工学硕士学位论文

基于 FLUENT 的建筑物风沙两相流场  
数值模拟

Numerical Simulation of Wind-Blown-Sand Two  
Phase Flow Field around the Building  
Based on Fluent

张默

哈尔滨工业大学

2008 年 12 月

国内图书分类号：TU312+.1

国际图书分类号：624

工学硕士学位论文

# 基于 FLUENT 的建筑物风沙两相流场 数值模拟

硕士研究生：张默

导师：肖仪清 教授

申请学位：工学硕士

学科、专业：结构工程

所在单位：深圳研究生院

答辩日期：2008 年 12 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TU312+.1

U.D.C: 624

Dissertation for the Master Degree of Engineering  
Numerical Simulation of Wind-Blown-Sand  
Two Phase Flow Field around the Building  
Based on Fluent

|                                      |                                |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Candidate:</b>                    | Zhang Mo                       |
| <b>Supervisor:</b>                   | Prof. Xiao Yiqing              |
| <b>Academic Degree Applied for:</b>  | Master of Engineering          |
| <b>Specialty:</b>                    | Structural Engineering         |
| <b>Affiliation:</b>                  | Shenzhen Graduate School       |
| <b>Date of Defence:</b>              | December, 2008                 |
| <b>Degree-Confering-Institution:</b> | Harbin Institute of Technology |

## 摘 要

我国是沙尘天气频发地区,据粗略统计,我国每年因风沙危害造成的直接经济损失高达 540 亿元人民币。近年来,人们越来越意识到风沙研究的重要性。20 世纪 80 年代,有研究者开始对风沙运动过程进行数值模拟,目前已提出了形式多样的模型。对于超高,大跨和轻质建筑物,结构对风作用的敏感性大大增强,致使风荷载成为此类建筑控制设计的主要荷载之一。目前,土木工程领域利用 CFD 方法研究风沙共同作用下建筑物表面的风荷载还非常少见。本文正是基于商业 CFD 软件 FLUENT,对风沙共同作用下建筑物周围风场作了数值模拟。

在建筑物静风荷载的模拟研究中,首先确定了湍流模拟方法——剪切应力模型(SST)。然后分别对两种典型模型:AIJ 模型和 CAARC 模型的数值模拟结果与风洞试验结果进行了对比分析,得出数值模拟结果与风洞试验结果有很好的一致性,证明了利用 CFD 方法模拟建筑物表面风压的准确性。

在建筑物风沙荷载的模拟研究中,首先,根据我国建国四十多年来的风沙天气统计报告,选用北京地区和甘肃地区发生的最大沙尘暴统计结果,确定了大气气溶胶的质量浓度极大值,沙粒的折算粒径,沙粒密度等。其次,在静风荷载结果的基础上加入第二相(颗粒相),假设沙粒浓度均匀分布,沙粒相与气体相没有相对滑移,且沙粒相与气体相单向耦合,即沙粒相对气体相无作用。最后,根据模拟结果进行对比分析:根据沙粒浓度不同,风速不同,对 AIJ 模型和 CAARC 模型的表面风压以及沙粒沉积进行了研究,验证了 CFD 在模拟两相流方面的可行性。

**关键词** 计算风工程;数值模拟;风沙两相流;表面风压;FLUENT

## Abstract

China is a region of frequent sandstorm weather, according to the roughly statistics, the annual damage caused by sandstorms against direct economic losses is up to 5.4 billion yuan. More and more people are aware of the importance of sandstorm research. In the 1980s, some researchers have started to research the sandstorm movement numerical simulation. In the current, many model forms have been proposed. For high, long-span building, the wind effect on the structures has been greatly enhanced, resulting in wind load control design of buildings as one major load. At present, in the civil engineering field, the use of CFD methods to study the effects of Wind-Blown-Sand load on the surface of buildings is very rare. This article is based on commercial CFD software FLUENT, researching of the numerical simulation of wind loads on the surface of building and Wind-Blown-Sand Two Phase Flow field around the building.

In the case of the numerical simulation of wind loads on the surface of building, first of all, determining the simulation of turbulence model - shear stress model (SST). Secondly, AIJ model CAARC model and numerical simulation results of wind tunnel tests and the results were compared and analyzed the results of numerical simulation and wind tunnel test results have a good consistency to prove that the use of CFD simulation of the surface of buildings the accuracy of the wind.

In the case of the numerical simulation of the load of wind-blown-sand two phase flow of building, first of all, according to the records of our country for more than four decades of the sandstorm weather reports, selecting of the biggest sandstorm statistical results in Beijing and Gansu, the quality of the atmospheric aerosol maxima concentration conversion of particle size. Secondly, in the case of the load on the basis of the second phase (the particle phase), sand particles have equivalent size, on the basis of the results of wind load, adding the second phase (the particle phase), assuming that the concentration of uniform sand, sand with gas phase and there is no slippage, and the gas phase sand coupler with a one-way coupling, that is, the sand has no relative of the gas phase. The last analysis: same wind sand; different concentrations, Wind sand, different concentrations. The last, according to

the simulation results: the same volume fraction of sand, different wind speeds; the same volume fraction of sand, different wind speeds, AIJ and CAARC models have been respectively studied. AIJ on CAARC model and the model of wind and sand deposited on the surface have been studied to verify the CFD simulation in two-phase feasibility.

**Keywords** computational wind engineering, numerical simulation,  
wind-blown-sand two phase flow, surface wind pressure, FLUENT

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 摘 要.....                    | I  |
| Abstract .....              | II |
| 第 1 章 绪论.....               | 6  |
| 1.1 课题来源与研究背景 .....         | 6  |
| 1.1.1 课题来源 .....            | 6  |
| 1.1.2 课题研究背景 .....          | 6  |
| 1.2 计算风工程的研究现状 .....        | 7  |
| 1.3 风沙运动数值模拟的研究现状 .....     | 8  |
| 1.3.1 风沙流数值模拟 .....         | 8  |
| 1.3.2 沙波纹数值模拟 .....         | 9  |
| 1.3.3 沙丘数值模拟 .....          | 10 |
| 1.3.4 粉尘运动数值模拟 .....        | 10 |
| 1.4 本文主要研究内容 .....          | 10 |
| 第 2 章 风沙两相流场数值模拟研究.....     | 12 |
| 2.1 引言 .....                | 12 |
| 2.2 风沙两相流概述 .....           | 12 |
| 2.2.1 沙粒的运动特性 .....         | 12 |
| 2.2.2 风沙流结构特征 .....         | 14 |
| 2.3 气相流场的数值模拟 .....         | 16 |
| 2.3.1 流场的基本控制方程 .....       | 16 |
| 2.3.2 湍流模型 .....            | 17 |
| 2.4 混合相的数值模拟 .....          | 19 |
| 2.4.1 气固两相流数学模型 .....       | 19 |
| 2.4.2 FLUENT多相流模型.....      | 20 |
| 2.5 本章小结 .....              | 23 |
| 第 3 章 典型建筑模型风沙两相流场数值模拟..... | 24 |
| 3.1 引言 .....                | 24 |
| 3.2 我国沙尘暴天气背景 .....         | 24 |
| 3.2.1 沙尘暴天气时空分布特征 .....     | 24 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 3.2.2 沙尘暴天气大气气溶胶特征 .....  | 25 |
| 3.3 AIJ模型风沙影响的数值模拟.....   | 25 |
| 3.3.1 几何建模 .....          | 25 |
| 3.3.2 计算流域的确定 .....       | 25 |
| 3.3.3 网格单元的选择 .....       | 26 |
| 3.3.4 边界条件的选取 .....       | 27 |
| 3.3.5 湍流模型及两相流模型 .....    | 27 |
| 3.3.6 求解参数的设置 .....       | 29 |
| 3.3.7 数值模拟结果与对比分析 .....   | 30 |
| 3.4 CAARC模型风沙影响的数值模拟..... | 33 |
| 3.4.1 数值建模及求解参数的选取 .....  | 33 |
| 3.4.2 数值模拟结果与对比分析 .....   | 35 |
| 3.5 本章小结 .....            | 39 |
| 结 论.....                  | 41 |
| 参考文献.....                 | 42 |
| 附 录 1.....                | 45 |
| 哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明.....   | 53 |
| 哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书.....   | 53 |
| 致 谢.....                  | 54 |



## 第 1 章 绪论

### 1.1 课题来源与研究背景

#### 1.1.1 课题来源

本课题来源于国家自然科学基金项目：土木工程相关的近地台风特性观测研究(项目批准号：50578057)。

#### 1.1.2 课题研究背景

沙尘暴是一种发生在沙漠和干旱地区的灾害性天气，不仅影响本地区，还可以通过大气传输作用影响大范围的下游地区的生态，环境和气候。沙尘暴是沙暴和尘暴的总称，是指强风把地面大量沙尘物质吹起卷入空中，使空气特别混浊，水平能见度小于 1km 的严重风沙天气现象。我国属于全球沙尘暴高发地区之一，西北地区是我国沙尘暴灾害史最长，受灾最严重的地区。1993 年 5 月 5 日甘肃河西走廊的金昌发生特大沙尘暴，这次沙尘暴西起新疆北部和东部，途径甘肃西部、宁夏中北部和内蒙古西部，波及 18 个地、市的 72 个县(旗)，1200 万人口经历了这场灾难，涉及范围总面积 110 平方公里(占国土总面积的 11.5%)，先后 10 个多小时的沙尘暴，造成直接经济损失人民币 5.425 亿元<sup>[1]</sup>。据粗略统计，我国每年因风沙危害造成的直接经济损失高达 540 亿元人民币。这一数字相当于西北 5 省区 1996 年财政收入的 3 倍。随着我国西北地区工农业建设的迅速发展，保护建筑物不受风沙侵蚀的问题也日益严重。但是，风沙物理学目前的研究水平还远远不能满足工程实践的各种需要。关于风沙运动的理论基本上都是半经验性质的。由于对风沙运动的观测资料少而且不全面，目前对沙尘暴启动，传输的分布特征了解得很少，因此运用数值建模的方法模拟沙尘暴逐渐成为风沙研究的重要手段之一。

随着计算机硬件水平的发展，从 20 世纪 60 年代起，一门新兴的流体力学分支-计算流体力学(CFD)逐渐形成。计算流体力学(CFD)目前已成为与理论流体力学和实验流体力学相提并论的研究方法，被广泛地应用于工程流场的数值模拟之中。在建筑工程实践中，已开始用来考虑风对结构物的效应，城市规划，

建筑火灾与灭火,建筑采暖与通风等问题<sup>[2]</sup>。CFD的飞速发展为风工程的研究手段带来了巨大的变革。目前,CFD对流场平均特性的计算结果已经达到工程实用化程度。但目前CFD还没有完全发展成熟,抽象出来的数学提法往往是十分复杂的多维非线性偏微分方程组,对其数值解的数学理论的研究尚不够充分。如严格的稳定性分析,误差估计,收敛性和唯一性理论的发展还不能提供完全可靠的数值解,还需进行验证确认等进一步的研究。

综上所述,不论是风沙两相流运动的研究还是CFD技术的研究都还处于初期阶段。目前,土木工程抗风研究的数值模拟在我国刚刚发展起来,而运用CFD方法考虑风沙两相流对建筑物的作用,在我国更是少有研究。本文应用Fluent软件平台模拟风沙两相流的运动状态,结合典型的建筑结构,模拟出风沙两相流对建筑物表面的作用,获得整个风场中各个物理量(如压力,速度,湍流动能等)的分布状态,进而对研究对象进行全面的分析。本课题的研究具有前沿性,为工程结构风沙流场方面的研究提出有益探索,以期对土木工程结构抗风设计提供有价值的参考。

## 1.2 计算风工程的研究现状

从上个世纪80年代开始CFD数值方法开始逐步渗入到风工程研究领域,并形成了一种重要的方法——计算风工程。计算风工程(Computational Wind Engineering, CWE)方法的核心内容是计算流体动力学(CFD),通过在计算机上对建筑物周围风流动所遵循的流体动力学方程进行数值求解,并且借助计算机图形技术将模拟结果形象地描述出来,以对建筑物周围风场进行仿真模拟。1992年,在日本东京举办了第一届国际计算风工程会议。2006年,第四届国际计算风工程会议在日本举行。会议旨在交流讨论数值模拟方法,湍流模型,大气边界层模型,中尺度气象模型,建筑物周围风环境,钝体绕流,房屋和桥梁空气动力特性,风和结构的相互作用等方面的问题<sup>[2]</sup>。目前,在研究建筑物周围风环境问题方面:1997年,Stathopolous对建筑物表面的风作用和其周围的流场环境进行了研究<sup>[3]</sup>。湍流模型的完善是计算风工程技术发展的关键。目前湍流模型方面的研究有三个趋势:标准 $k-\varepsilon$ 模型的改进;LES模型的修正;RSM模型的修正。采用经典湍流模型的CFD已经可以得到可靠的对流场平均特性的描述(例如平均风压,平均风荷载等)。加拿大的University of Waterloo的Y. Cheng, F.S. Lien等人<sup>[4]</sup>对矩形立方体形状的建筑物的流场采用LES方法和标准 $k-\varepsilon$ 模型方法进行了模拟。结果表明,LES方法钝体流场的模拟的各个方面都

要比标准  $k-\varepsilon$  模型方法更准确更有效。

近年来,我国也有越来越多的学者进行了CFD方面的研究。杨伟,顾明(1993)基于软件平台FLUENT,对单栋高层建筑的定常风流场进行了数值模拟,并将计算结果与风洞试验进行了比较<sup>[5]</sup>。结果表明,基于FLUENT可以给出工程应用精度的解。2006年,浙江大学的马剑<sup>[6]</sup>对群体建筑风环境进行了数值模拟,建立了以平均Navier-Stokes方程和RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型为基础的湍流流动基本方程及数值离散与求解方法,并与国外已有的风洞试验结果作了比较,验证了数值模拟的正确性和有效性。在两相流流体模拟方面,2008年,周昶毅等<sup>[7]</sup>对于大跨平面屋盖结构的风致雪压分布规律作了研究,采用两相流理论模拟风荷载雪飘作用,对FLUENT软件进行了二次开发,以一实际大跨屋盖结构—北京首都机场3号航站楼T3A为研究对象,结果表明:风洞实验测得的屋盖表面风压分布数据与模拟结果二者之间有一定一致性,证实了风致雪飘计算方法的准确性。

### 1.3 风沙运动数值模拟的研究现状

利用数值模拟方法研究风沙运动开始于1985年在丹麦举行的国际风沙物理学会议<sup>[8]</sup>。经过二十多年来的研究,已取得了不少研究成果。目前,数值模拟的内容主要分为风沙流数值模拟,沙波纹数值模拟,沙丘数值模拟和粉尘运动数值模拟等。

#### 1.3.1 风沙流数值模拟

风沙运动的数值模拟中,以风沙流数值模拟的研究最为详尽。风沙流数值模拟的研究内容主要是颗粒的跃移运动。完整的风沙形成过程分为四个子过程:颗粒的初始起跃过程;颗粒在气流中的运移过程;气流速度的改变过程;颗粒与床面的碰撞过程及床面形态的改变过程。因此风沙流数值模拟也就分为以上四个子模型。1941年,Bagnold首先提出临界起沙风速模型用来计算颗粒的临界起动风速<sup>[9]</sup>,并假定床面由单一粒径的松散颗粒组成。目前数值模拟研究仍采用此模型。1991年,Anderson和Haff提出<sup>[10]</sup>,当风对床面的剪切力超过临界剪切力时,单位时间内单位面积床面起跃的颗粒数计算公式,

$$N_a = \zeta \left( \tau_a - \tau_c \right) \quad (1-1)$$

式中  $\tau_a$  ——床面平均剪切压力;

$\tau_c$  ——临界剪切压力;

$\zeta$  ——系数, 一般为 105 个每秒/牛顿

1998 年, Nikami 等人<sup>[11]</sup>采用欧拉—拉格朗日离散相方法模拟风沙跃移运动中沙粒冲击多粒径床面的碰撞过程, 从颗粒层面上研究了沙粒运动的详细信息。

我国在这方面的研究还很少, 周芳等人(2004)采用 Euler 方法的双流体模型对二位风沙两相流进行了数值模拟<sup>[12]</sup>, 研究不同边界条件下的气固两相速度与浓度分布以及进口条件下的风沙流动。结果表明: 对边界为固体壁面的流动, 沙粒的边界条件对其浓度分布有严重的影响。进口效应的存在使得在较短的距离内不能获得合理的流动结构, 要求计算域有足够的长度, 使流动结构不受进口效应的影响。亢力强和郭烈锦(2005)对风沙跃移中颗粒冲击起动过程进行了数值模拟<sup>[13]</sup>。在模型中, 把气相视为连续介质, 建立欧拉方程, 对离散颗粒采用拉格朗日方法模拟。颗粒间的相互作用采用软球模型描述。计算结果表明, 该模型可以模拟出沙粒冲击床面的动态起动过程, 并且与均匀平整床面相比, 在非均匀平整床面上的沙粒更容易碰撞起跳, 也更具有随机性。这一结果进一步揭示了风沙运动中颗粒碰撞起跳机理。于涛等人(2004)针对沙尘暴天气的风沙气固两相流, 采用 FLUENT 软件, 对悬移层的风沙运动进行了 2D 数值模拟分析<sup>[14]</sup>, 比较了流体边界条件对流场的影响。文章提出了一个新的沙粒起动体积浓度的表达式,

$$Z'_0 = Z_0 G \frac{\rho_g u_*^2}{\sqrt{D}} \quad (1-2)$$

式中  $Z'_0$  ——床面处沙粒的体积浓度;

$Z_0$  ——床面密实度;

$G$  ——由地面状况和风速决定的常数, 取  $3.65 \times 10^{-6}$ ;

$\rho_g$  ——沙粒密度;

$u_*$  ——摩阻速度;

$D$  ——沙粒粒径

将此表达式在计算中作为边界条件, 避免了对床面复杂状况的直接描述。

### 1.3.2 沙波纹数值模拟

此方向研究并不多, Aderson 于 1987 年首先提出了一个碰撞沙波的理论模

型<sup>[15]</sup>。模型采用连续性方程来描述低跃移颗粒的起跃空间分布和飞行距离的概率分布。我国的买买提明·艾尼等人(2004)研究了在风的作用下沙流场数学模型的建立过程<sup>[16]</sup>。对气流场和沙流场进行详细分析,建立了沙漠流场的数学模型。

### 1.3.3 沙丘数值模拟

对沙丘的数值模拟研究目前还处于起步阶段,没有形成完整的模拟体系,模拟对象也局限于新月形沙丘。其中输沙率模型仍采用Bagnold于1941年提出的模型。1985年,Howard等人<sup>[17]</sup>模拟指出新月形沙丘的形状是颗粒大小,风沙流饱和程度和风向变化的函数。1991年,Weng W.S提出流星模型作为模拟所选的气流离散模型<sup>[18]</sup>,用以预测沙丘表面气流,流形和剪切压力的分布状况。

### 1.3.4 粉尘运动数值模拟

尘粒运动的模拟分为中尺度模拟和大尺度模拟。1994年,Berkofsky在文章中提出了中尺度模拟模型的建立方法<sup>[19]</sup>。Westphal等人<sup>[20]</sup>对大尺度模拟模型的建立作了相关研究。目前,大尺度模拟仅限于研究尘粒在大气循环中的传播状况,以揭示尘粒传输与气候变化的关系。

## 1.4 本文主要研究内容

本论文采用计算风工程方法,对典型建筑物模型风场与风沙两相流场数值模拟进行研究。利用CFD商业软件FLUENT进行数值模拟。根据模拟结果,研究风沙流对建筑物表面的作用。工作内容具体包括三个部分内容:

1) 学习计算流体动力学基础,掌握通用CFD软件Fluent及其前处理软件GAMBIT模拟钝体流场的方法。研究建筑物周围风场与风沙两相流场数值模拟方法。

2) 建筑物模型周围的风场与风沙两相流场数值仿真模拟。首先模拟标准建筑物模型:AIJ模型和CAARC模型,对结果进行对比分析。然后在已知结果的基础上,加入第二相(颗粒相),研究风沙流对建筑物表面风压的影响。

3) 选取两种沙粒浓度,两种风速,分别对AIJ模型和CAARC模型作数值模拟,研究不同沙粒浓度,不同风速下的风沙流作用。

本文主要研究内容具体如图1-1所示。

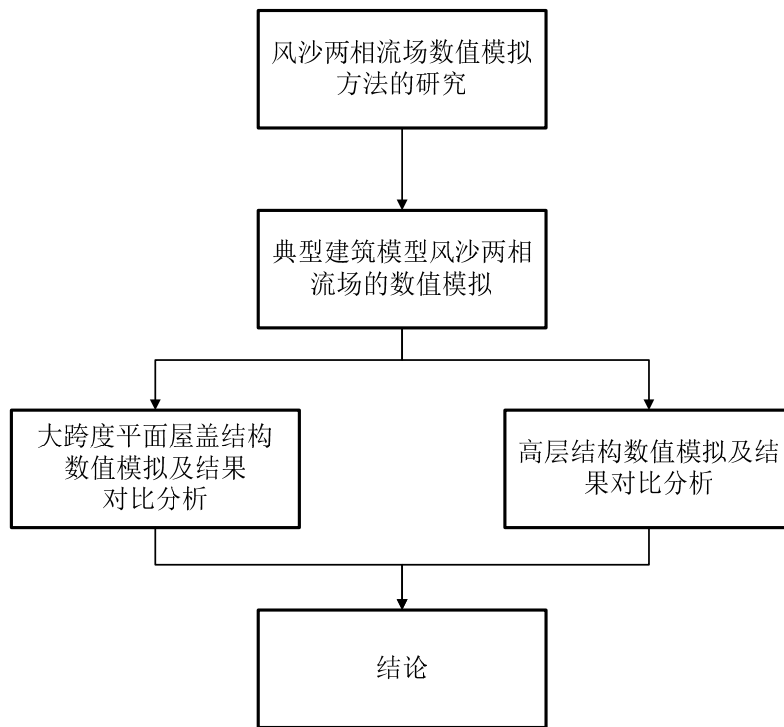


图 1-1 本文主要研究内容框图

Fig.1-1 Block diagram of research work in this dissertation

## 第 2 章 风沙两相流场数值模拟研究

### 2.1 引言

计算流体动力学(CFD)的基本思想是:把原来在时间域和空间域上连续的物理量的场用有限个离散点上变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式建立关于这些离散点上场变量的代数方程组,求解获得场变量的近似值。风沙两相流的数值模拟,根据把第二相(颗粒相)看成离散个体或连续流体分为欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法。FLUENT 软件在模拟多相流方面就是基于这两种算法。

### 2.2 风沙两相流概述

#### 2.2.1 沙粒的运动特性

2.2.1.1 沙粒运动形式 沙粒运动是风沙两相流和风沙地貌研究中的重要组成部分。沙粒运动主要有蠕移,跃移和悬移三种形式。

(1) 悬移 沙粒悬浮在空气中流动而不与地面接触。悬移物质的颗粒细小,一般直径小于 0.2mm,搬运距离较远、位置较高,占总搬运量的 5%-10%。

(2) 跃移 沙粒以跳跃方式贴地表随风运动。跃移物质颗粒较粗,一般直径为 0.2-0.5mm 之间,占总搬运量的 70%-80%,是风沙流最主要的搬运方式。

(3) 蠕移 沙粒沿地表滑动或滚动。蠕移物质颗粒最粗,一般直径大于 0.5mm,占总搬运量的 15%-20%。

沙粒的具体运动形式如图 2-1 所示。

2.2.1.2 沙粒的受力分析 沙粒在气流中所受的作用力主要包括重力、压力梯度力、升力、Stocks粘性力、附加质量力、Basset力、Magnus力和Saffman力<sup>[21]</sup>。

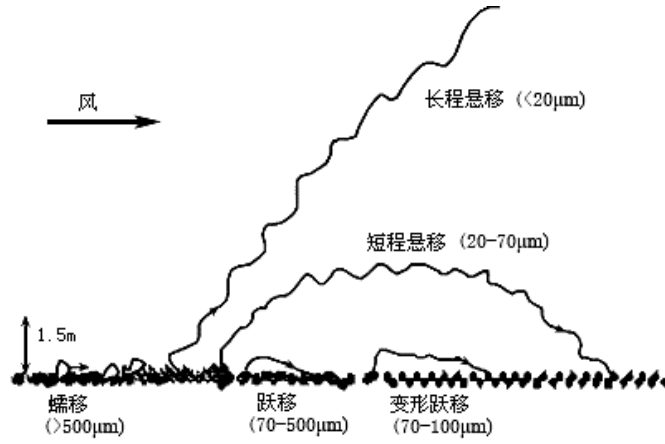


图 2-1 沙粒运动形式示意图

Fig. 2-1 The process of sediment particles transport

(1) 重力

$$F_G = \frac{1}{6} \pi \rho_p D^3 g \quad (2-1)$$

式中  $\rho_p$  ——均匀球体的密度；

$D$  ——沙粒直径

(2) 压力梯度力

$$F_T = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \frac{dp}{dy} \quad (2-2)$$

式中  $\rho$  ——流体密度；

(3) Stocks 粘性阻力(拖曳力) 由于沙粒与气流的相对运动而产生，是沙粒运动的主要驱动力，方向与沙粒相对于气流的运动速度相反。

沙粒相对雷诺数，

$$Re_p = \frac{|U - U_p| D}{\nu} \quad (2-3)$$

式中  $U$  ——气流的张量分量；

$U_p$  ——沙粒速度的张量分量；

$\nu$  ——气体的运动粘性系数

根据 Stocks 阻力公式，当  $Re_p < 1$  时，



$$F_D = 3\pi\mu D(U - U_p) \quad (2-4)$$

式中  $\mu$  ——流体的动力粘性系数；

当  $Re_p > 1$  时，可采用标准阻力公式，

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{8} \rho \pi D^2 |U - U_p| (U - U_p) \alpha \quad (2-5)$$

式中  $C_D$  ——阻力系数；

(4) **Magnus 力** 由沙粒的旋转产生。Magnus 升力表达式，

$$F_M = \frac{\pi}{8} D^3 \rho (U - U_p) \left( \omega - \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial p} \right) \quad (2-6)$$

式中  $\omega$  ——旋转小球的角速度；

$\frac{\partial U}{\partial p}$  ——小球所在处流体的速度梯度；

(5) **Saffman 力** 1965 年由 Saffman 给出在慢速切变流中小球受垂直于流动方向的力(即升力)，

$$F_S = 1.615 \mu (U - U_p) D^2 \sqrt{\frac{\partial U}{\partial y}} \div \nu \quad (2-7)$$

式中  $\frac{\partial U}{\partial y}$  ——小球所在处流体的速度梯度；

## 2.2.2 风沙流结构特征

风沙流是气流及其搬运的沙粒的混合流。它的形成依赖于空气与沙质地表两种不同密度的物理介质的相互作用。风沙流中沙粒随高度的分布称为风沙流结构。

**2.2.2.1 沙粒浓度随高度的分布** 野外观测的数据显示，气流搬运的沙量绝大部分(90%以上)是在沙面以上 30cm 的高度内通过的，尤其是集中在 0~10cm 的高度(约占 80%)，也就是说风沙运动是一种近地面的沙粒搬运现象。具体数值如表 2-1 所示<sup>[22]</sup>。

表 2-1 风速  $U=9.8\text{m/s}$  时不同高度风沙流搬运的沙量  
 Table 2-1  $U=9.8\text{m/s}$ , values of the wind flow sediment transportation

| 高度(cm) | 0~10  | 10~20 | 20~30 | 30~40 | 40~50 | 50~60 | 60~70 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 沙量(%)  | 79.32 | 12.30 | 4.79  | 1.50  | 0.95  | 0.40  | 0.74  |

我国的刘振兴曾根据湍流扩散理论研究过稳定度不同的大气中悬移颗粒浓度随高度的分布，并得到关系式<sup>[23]</sup>，

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \exp\left(-\omega \frac{Ku}{u_*}\right) \quad (2-8)$$

式中  $\sigma$  ——任意高度上的悬沙浓度；

$\sigma_0$  ——参考高度上的悬沙浓度；

$K$  ——卡门常数，0.4；

$u$  ——该高度上气流的速度；

$u_*$  ——摩阻速度；

$\omega$  ——沙粒的频率

可见，含沙量随高度增加按指数规律衰减。需要说明的是，他只讨论了作悬移运动的沙粒的分布，而没有涉及到风沙运动中占主要部分的跃移颗粒的浓度分布，因此上式只适用于跃移区以外的各高程。事实上，这一结论并无理论基础，有人曾对均匀沙情况下风沙层中沙子浓度分布作过计算，其结果与指数律有很大的不同。据估计，沙粒粒径均匀与否是造成这种差异的主要原因之一。

**2.2.2.2 风沙流风速廓线** 风沙流边界层自地表面上可分为内外两层，内边界层为跃移边界层，外边界层为悬移层。跃移边界层和悬移层区别的关键是：在跃移边界层内跃移颗粒与气流之间发生复杂的动量传输，而在外边界层中，这种作用及其微弱。外边界层的风速可用下式计算<sup>[24]</sup>，

$$u(z) = \frac{u_*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2-9)$$

式中  $u(z)$  ——外边界层任意高度处的风速；

$u_*$  ——摩阻速度；

$K$  ——卡门常数, 0.4;

$z_0$  ——参考高度

可见, 风沙流悬移层内风速的分布仍然遵循对数规律. 至于跃移层, 由于跨度不大(一般只有几厘米到十几厘米量级), 其中沙粒浓度又较高, 使得测量其中气流分布速度非常困难, 目前尚未提出适当的描述公式<sup>[25]</sup>。

**2.2.2.3 输沙率** 气流在单位时间通过单位宽度或面积所搬运的沙量叫做风沙流的固体流量, 也称为输沙率。影响输沙率的因素很复杂, 它不仅取决于风力的大小、沙粒粒径、形状和沙粒比重, 而且也受沙粒的湿润程度、地表状况及空气稳定度的影响, 所以要精确地表示风速与输沙量的关系是较困难的<sup>[26]</sup>。到目前为止在实际工作中对输沙率的确定, 一般仍多采用集沙仪在野外直接观测, 然后运用相关分析方法, 求得特定条件下的输沙率与风速的关系。

## 2.3 气相流场的数值模拟

### 2.3.1 流场的基本控制方程

流体运动的基本控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程<sup>[27]</sup>。

(1) **质量守恒方程** 单位时间内流体微元体中质量的增加, 等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量, 由于作用在建筑物周围气流被视作不可压缩流体,

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (2-10)$$

(2) **动量守恒方程** 微元体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和, 动量守恒方程是由牛顿第二定律推导出来的,

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i U) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_i \quad (2-11)$$

式中  $u_i$  ——  $u$ 、 $v$ 、 $w$  三个方向速度;

$U$  ——速度矢量;

$\rho$  ——流体密度;

$\mu$  ——动力粘度(dynamic viscosity)

### 2.3.2 湍流模型

湍流是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则运动。在湍流中流体的各种物理参数，如速度、压力、温度等都是随时间和空间发生随机的变化，这些随机的变化是由流体内不同尺度的涡旋的随机运动造成的。目前，求解湍流问题一般有三种方法<sup>[28]</sup>。

**2.3.2.1 直接模拟** 直接模拟简称 DNS(Direct Numerical Simulation)是直接求解三维瞬态的 Navier-Stokes 方程的方法。这种方法能提供流场中完整的信息，可以得到完全的精确解。由于湍流运动十分复杂，数值模拟时必须采用很小的时间与空间步长，才能分辨出湍流中详细的空间结构及变化剧烈的时间特性。基于这个原因，DNS 目前仅限于相对低的雷诺数中湍流流动模型。

**2.3.2.2 应用 Reynolds 时均方程的模拟方法** 基于雷诺时均方程的湍流模拟方法是最早发展的湍流模拟方法，这里介绍工程中广泛应用的两方程模型：标准  $k-\omega$  模型和剪切应力输运  $k-\omega$  模型。本文采用的即是剪切应力输运  $k-\omega$  模型。

(1) **标准  $k-\omega$  模型** 标准  $k-\omega$  模型是基于湍动能  $k$  和特殊耗散率  $\omega$  的模型输运方程的一种经验湍流模型，湍动能  $k$  和特殊耗散率  $\omega$  的输运方程，

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad (2-12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2-13)$$

式中  $G_k$  ——由平均速度梯度引起的湍动能生成项；

$G_\omega$  —— $\omega$  的生成项；

$\Gamma_\omega$  和  $\Gamma_k$  —— $k$  和  $\omega$  的扩散项；

$Y_k$  和  $Y_\omega$  —— $k$  和  $\omega$  的湍动耗散项；

$S_k$  和  $S_\omega$  ——用户自定义源项

(2) **剪切应力输运  $k-\omega$  模型** SST 模型的  $k$  和  $\omega$  的输运方程与标准  $k-\omega$  模型类似，分别为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2-14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2-15)$$

式中  $\tilde{G}_k = (G_k, 10\rho\beta k\omega)$ ;

$$\tilde{G}_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k;$$

$D_\omega$ ——交叉耗散修正项

(3) **壁面函数** 空气流过钝体表面时，在离壁面很近的地方，粘性力将抑制流体切线方向速度的变化，而且流体运动受壁面阻碍从而抑制了正常的波动，使与壁面接触的空气黏附在其表面，形成一很薄的表面层成为边界层。湍流边界层可分为两个区域：内层和外层。内层可再分为：粘性底层，过渡层和完全湍流层。外层以惯性力作用为主，湍流切应力占主导地位，流动条件与来流条件有关。具体形式如图 2-2 所示。

对于近壁面区域有两种建模方法。一种是采用被称为“壁面函数”的半经验公式来解决。另一种方法被称为“近壁面模型”法，湍流模型被修正，从而使壁面处受粘性力影响的区域也能用网格划分来解决。目前壁面函数的种类有很多，本文采用的是Fluent提供的适用于钝体流场的非平衡壁面函数(Non-Equilibrium Wall Functions)，它是一种考虑压力梯度的二层模型壁面函数。

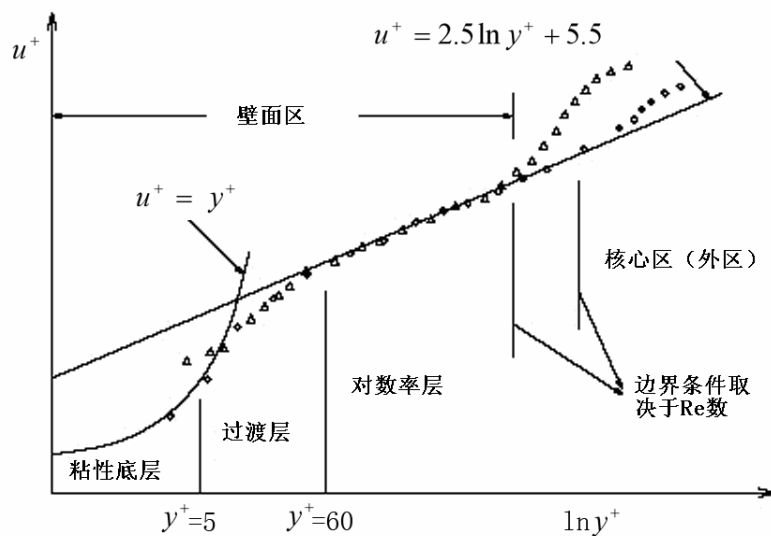


图 2-2 壁面区速度分布示意图

Fig. 2-2 Distribution of velocity near the wall

**2.3.2.3 大涡模拟** 大涡模拟方法 LES(Large Eddy Simulation)把湍流的大涡和小涡分开处理，用瞬态的三维 Navier-Stokes 方程求解各向异性的大尺度涡；通过一种近似的模型来模拟各向同性的小尺度涡。大涡模拟的基本理论是：湍流的脉动与混合主要是由大尺度的涡造成的，大尺度的涡通过相互作用把能量传递

给小尺度的涡，而小尺度的涡旋主要起到耗散能量的作用，几乎是各向同性的。LES 对计算机的内存和 CPU 的速度要求仍然很高，近年来随着计算机硬件的飞速发展，大涡模拟的研究与应用日趋广泛。

## 2.4 混合相的数值模拟

### 2.4.1 气固两相流数学模型

目前气固两相流的数学模型分为连续介质模型和离散颗粒群模型。

**2.4.1.1 连续介质模型** 连续介质模型是把颗粒当作连续介质来考虑。可分为以下几种模型：

(1) **无滑移模型** 无滑移连续介质模型<sup>[29]</sup>基本建设条件：粒相只有尺寸差别，不同的尺寸就是不同的相，其温度和密度均相等；粒相的时均速度等于当地流体相速度，即相之间没有相对速度；相和相之间的相互作用，即质量，动量和能量的交换类似于混合物中各组分的作用，颗粒相与流体相之间的阻力忽略不计。

(2) **小滑移模型** 假定颗粒在流体的夹带下运动，同相的速度，温度，物质密度和颗粒直径相同，颗粒在流场中有扩散漂移，即小滑移<sup>[30]</sup>。此模型考虑了颗粒的滑移及因滑移引起的阻力，但还是没有全面地描述颗粒的运动，与实验结果相差很大。

(3) **拟流体(多流体)模型** 拟流体模型认为颗粒相是与实际流体相渗透的拟流体。基本假设是：在流场中，颗粒相与气相共存并相互渗透，每一项具有各自的速度，温度和体积分数。每一颗粒相在空间中具有连续的速度，温度和体积分数的分布。用初始尺寸来区分颗粒相，每个尺寸组的颗粒具有相同的速度和温度。此模型在欧拉坐标系中处理颗粒相，它和轨道模型不同之处在于引入了颗粒相粘性，导热，扩散系数这些拟流体特性，因而易于完整地考虑颗粒相的各种湍流运输状态。

**2.4.1.2 离散颗粒群模型** 离散颗粒群模型模型是把颗粒当作离散介质来考虑。可分为以下几种：

(1) **单颗粒动力学模型** 这是研究气固两相流最简化的模型。在该模型中忽略颗粒存在对流体流动的影响，并考察已知流体中互不相关的无脉动的单颗粒的运动。包括颗粒平均运动，颗粒速度及温度沿轨道的变化<sup>[31]</sup>。

(2) **颗粒随机轨道模型** 颗粒随机轨道模型是以流体湍流统观模型为基础，加上颗粒瞬时运动方程，用随机方法来模拟湍流<sup>[32]</sup>。该方法始于Hutchinson，此后又有很多学者不断研究拓展和完善了这一模型。该模型近年来在工程问题中得到了广泛应用。

(3) **颗粒湍流扩散的拉格朗日模型** 该模型是对颗粒随即轨道模型的修正，充分考虑了颗粒的湍流扩散效应<sup>[33~35]</sup>。修正方法有人为的加入漂移速度，漂移力的概念和用随机的方法来处理颗粒的两种，第二种目前应用得较多。

## 2.4.2 FLUENT 多相流模型

目前有两种数值计算的方法处理多相流：欧拉—拉格朗日方法和欧拉—欧拉方法。Fluent 中的多相流模型就是基于这两种算法。

2.4.2.1 **欧拉—拉格朗日方法** 在 Fluent 中的拉格朗日离散相模型遵循欧拉—拉格朗日方法。流体相被处理为连续相，直接求解时均纳维-斯托克斯方程，而离散相是通过计算流场中大量的粒子，气泡或是液滴的运动得到的。离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。该模型的一个基本假设是，作为离散的第二相的体积比率应很低。粒子或液滴运行轨迹的计算是独立的，它们被安排在流相计算的指定的间隙完成。

2.4.2.2 **欧拉—欧拉方法** 在欧拉—欧拉方法中，不同的相被处理成互相贯穿的连续介质。由于一种相所占的体积无法再被其他相占有，故此引入相体积率(phasic volume fraction)的概念。体积率是时间和空间的连续函数，各相的体积率之和等于 1。从各相的守恒方程可以推导出一组方程，这些方程对于所有的相都具有类似的形式。从实验得到的数据可以建立一些特定的关系，从而能使上述方程封闭，另外，对于小颗粒流(granular flows)，则可以通过应用分子运动论的理论使方程封闭。

在 FLUENT 中，共有三种欧拉-欧拉多相流模型，分别为：流体体积模型(VOF)，混合物模型(Mixture)，以及欧拉模型(Eulerian)。

(1) **VOF模型** 所谓VOF模型，是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。在VOF模型中，不同的流体组分共用着一套动量方程，计算时在全流场的每个计算单元内，都记录下各流体组分所占有的体积率。

(2) **混合物模型** 混合物模型可用于两相流或多相流(流体或颗粒)。因为在欧拉

模型中,各相被处理为互相贯通的连续体,混和物模型求解的是混合物的动量方程,并通过相对速度来描述离散相。混合模型允许相之间互相贯穿。所以对一个控制容积的体积分数 $\alpha_q$  and  $\alpha_p$ 可以是0和1之间的任意值,取决于相 $q$ 和相 $p$ 所占有的空间。混合模型使用了滑流速度的概念,允许相以不同的速度运动。当然,相也可以假定以相同的速度运动,混合模型就简化为均匀多相流模型。

混合模型求解混合相的连续性方程,混合的动量方程,混合的能量方程,第二相的体积分数方程,还有相对速度的代数表达(如果相以不同的速度运动)。

### 1)混合模型的连续方程(Continuity Equation for the Mixture)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = \dot{m} \quad (2-16)$$

式中  $\bar{v}_m$  ——质量平均速度;

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_m} \quad (2-17)$$

$\rho_m$  ——混合密度;

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (2-18)$$

$\alpha_k$  ——第 $k$ 相的体积分数;

$\dot{m}$  ——由于气穴或用户定义的质量源的质量传递;

### 2)混合模型的动量方程(Momentum Equation for the Mixture)

混合模型的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得。它可表示为方程式,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_{dr,k} \bar{v}_{dr,k} \right) \quad (2-19)$$

式中  $n$  ——相数;



$\bar{F}$  —— 体积力;

$\mu_m$  —— 混合粘性:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (2-20)$$

$\bar{v}_{dr,k}$  —— 第二相  $k$  的飘移速度:

$$\bar{v}_{dr,k} = \bar{v}_k - \bar{v}_m \quad (2-21)$$

### 3) 混合模型的能量方程(Energy Equation for the Mixture)

混合模型的能量方程采用如下形式,

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \bar{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (2-22)$$

式中  $k_{eff}$  —— 有效热传导率;

$S_E$  —— 所有的体积热源;

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (2-23)$$

### 4) 相对(滑流)速度和漂移速度(Relative (slip) Velocity and the Drift Velocity)

相对速度(也指滑流速度)被定义为第二相( $p$ )的速度相对于主相( $q$ )的速度,

$$\bar{v}_{qp} = \bar{v}_p - \bar{v}_q \quad (2-24)$$

漂移速度和相对速度( $\bar{v}_{qp}$ )通过以下表达式联系,

$$\bar{v}_{dr,p} = \bar{v}_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \bar{v}_{qk} \quad (2-25)$$

### 5) 第二相的体积分数方程(Volume Fraction Equation for the Secondary Phases)

从第二相  $p$  的连续方程, 可以得到第二相  $p$  的体积分数方程,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (2-26)$$

(3) **欧拉模型** 欧拉模型是 Fluent 中最复杂的多相流模型。它建立了一套包含有  $n$  个的动量方程和连续方程来求解每一相。压力项和各界面交换系数是耦合在一起的。耦合的方式则依赖于所含相的情况，颗粒流(流-固)的处理与非颗粒流(流-流)是不同的。对于颗粒流，可应用分子运动理论来求得流动特性。不同相之间的动量交换也依赖于混合物的类别。通过 FLUENT 的用户自定义函数(user-defined functions)，可以定义动量交换的计算方式。

## 2.5 本章小结

本章首先从微观和宏观角度描述了风沙两相流的基本特征。微观方面，对沙粒的受力情况和沙粒的运动形式作了详细介绍；宏观方面，对风沙流结构作了大体介绍，包括沙粒浓度的分布，风速廓线以及输沙率的特点。接着总结了流场的数值模拟方法，针对边界层风场的湍流特性，引入了三种模拟湍流的方法——直接模拟、应用雷诺时均方程的模拟方法和大涡模拟方法。针对风沙两相流引入了两种模拟方法——欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法。本章为下一章的具体计算提供了理论基础。

## 第 3 章 典型建筑模型风沙两相流场数值模拟

### 3.1 引言

风沙两相流的模拟是在气体相模拟的基础之上，加入沙粒的影响。由于沙粒体积分数在两相流内所占比例非常小，根据颗粒加载率选择多相流模型。本章基于 Fluent 软件平台模拟建筑物表面风压的分布情况，分别采用 AIJ 的 1:1:0.5 矮立方体模型和 CAARC 模型，得到了净风和挟沙风作用下的建筑物表面风压分布和沙粒沉积情况。

### 3.2 我国沙尘暴天气背景

#### 3.2.1 沙尘暴天气时空分布特征

我国是沙尘暴天气频发地区，我国西北地区是世界四大沙尘暴高发地(中亚，北美，中非，澳大利亚)之一的中亚沙尘暴区的组成部分。研究表明，我国现代浮尘，尘暴和降沙天气的粉尘源是在甘肃，内蒙和南疆的干燥沙漠地区。从沙尘暴沉降量的分布地域看，河西走廊是高值区，随着冷锋气流对沙尘搬运中能量的逐渐减弱，致使不同粒径的沙尘物质按由粗至细的次序沉降，整体呈西北-东南带状分布。其中，南北最宽处约 11 个纬度，东西长约 34 个经度<sup>[36]</sup>。沙尘暴天气根据最大风速与最小能见度划分为四个等级，如表 3-1 所示。

表 3-1 沙尘暴天气强度划分标准  
Fig. 3-1 values of five constants in  $k-\epsilon$  model

| 强度 | 瞬间极大风速(m/s)            | 最小能见度(m)   |
|----|------------------------|------------|
| 特强 | $\geq 10$ 级, $\geq 25$ | $\leq 50$  |
| 强  | $\geq 8$ 级, $\geq 20$  | $\leq 200$ |
| 中  | 6~8 级, $\geq 17$       | 200~250    |
| 弱  | 4~6 级, $\geq 10$       | 500~1000   |

我国沙尘暴天气每年发生在春季 4 月到 5 月，近年来有提前的趋势。西北地区每年强沙尘暴天气发生时间集中，频率高，强度大的时期为春季 4 月 1 日

到5月30日,每天13-18时是沙尘天气易发高峰期<sup>[38]</sup>。

### 3.2.2 沙尘暴天气大气气溶胶特征

北京春季风沙天气气溶胶的来源主要为沙漠,沙化土地的尘粒,土壤微粒,风蚀沙尘及建筑工地的水泥石灰尘等自然源,其物理化学特征与无风沙时的气溶胶有明显差异。主要表现为自然排放的特征,人为污染影响相对减弱。造成北京风沙天气机率最大的是扬沙,占70%左右,其次是浮沉,25%左右,而沙尘暴仅占5%。1990年4月25日发生在北京的沙尘暴,大气气溶胶质量浓度为近二十年来最高的一次: $1.14947 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[38]</sup>。西北地区,1993年5月5日15时42分,甘肃河西走廊的金昌出现了黑风暴天气,最大瞬时风速达34m/s,风力12级,最小能见度为0m。在15时44分到16时,16时30分到16时45分相继两次白昼变为黑夜,伸手不见五指。黑风暴到来的同时,伴有大幅度降温和雷电现象。根据探空资料,沙尘暴发生时所形成的沙尘壁高达300m,沙暴影响高度在2100m,当地的气溶胶的质量浓度达 $1.017 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。沙尘暴过后,沉积物的粒径分布主要集中在 $4.75\Phi$ - $6.75\Phi$ ,沉积物的平均粒径为 $6.444\Phi$ <sup>[39-40]</sup>。

## 3.3 AIJ 模型风沙影响的数值模拟

### 3.3.1 几何建模

此模型最初是日本建筑研究所AIJ(Architectural Institute of Japan)为了研究CFD技术的应用所建的比例为1:1:0.5的矮立方体模型<sup>[41]</sup>。1992-1998年间,该研究所联合了3所大学和9个工业研究所对于此模型展开了大量的风洞试验和CFD模拟研究。本文在利用其风洞试验数据的基础上,作风沙两相流的数值模拟研究。在CFD软件Fluent6.3.26的前处理模块Gambit2.3.16中,按原型尺寸建立几何模型。模型尺寸:60m×60m×30m。

### 3.3.2 计算流域的确定

位于大气边界层中的建筑物风对其绕流时,处于一个完全开口的流动风场中,但风对建筑物作用的影响具有一定的范围,在数值模拟时可给定有限的三

维计算区域模拟实际的流动风场。计算流域的确定需要考虑：随着计算区域的增大，网格数量增大，计算量增大，计算时间增长；而计算域过小，则可能导致模拟结果失真。本文采用顺风向计算流域与建筑物高度比为 30，将建筑放置在计算流域入口 1/3 处，出口边界位于建筑物后远大于建筑物高度 10 倍的地方，以保证流动达到充分发展状态。计算流域尺寸：900m(30H)×600m(20H)×300m(10H)。AIJ 模型的计算流域如图 3-1 所示。

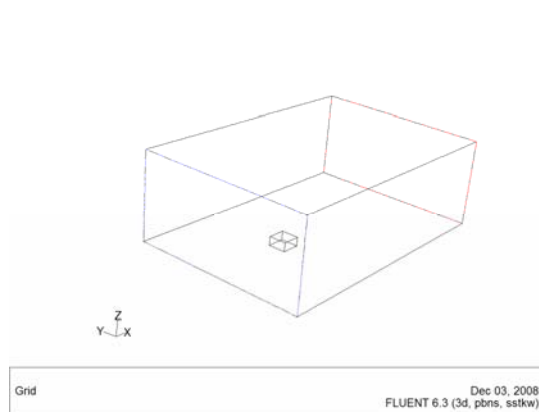


图 3-1 模型计算流域

Fig. 3-1 The scale of computation model

### 3.3.3 网格单元的选择

网格的类型和网格数量对计算结果的准确性具有很大的影响。非结构网格具有很好的灵活性和适应性，易于进行网格自适应。网格划分时，网格的数量较少会使得计算精度得不到保证，但数量太多，求解时间太长，不能满足实际需要。需要找到一个平衡点使得既满足精度要求，同时计算时间又不会过长。通过多次试画，最终将网格确定为非结构混合网格，得到网格节点数为 468660 个，体单元数为 938416 个。AIJ 模型的网格布置如图 3-2 所示。

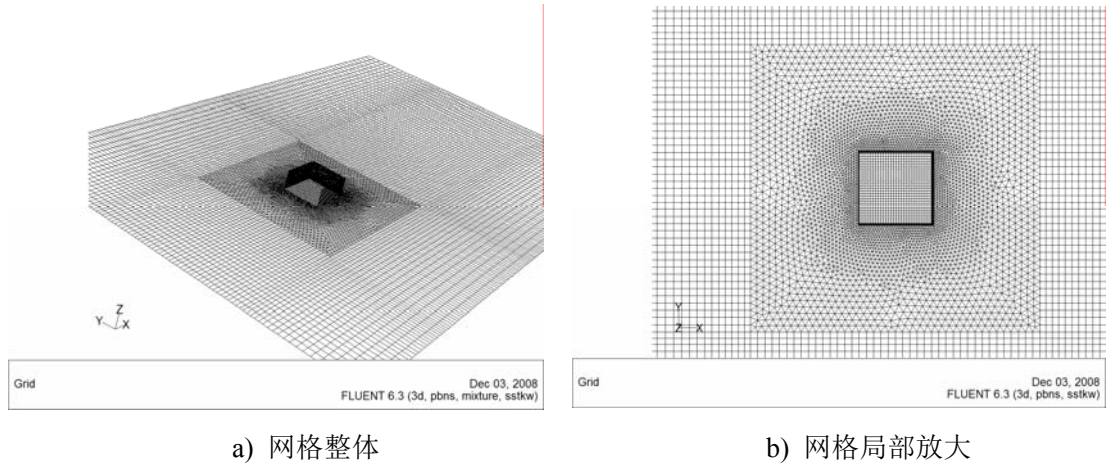


图 3-2 计算模型网格

Fig. 3-2 Computation model's mesh grid

### 3.3.4 边界条件的选取

AIJ 模型边界条件包括：入口边界条件，出口边界条件，壁面边界条件。具体设置列于表 3-2 中。

### 3.3.5 湍流模型及两相流模型

(1) 湍流模型及两相流模型的选取 湍流模型采用剪切应力输运  $k-\omega$  模型 (SST  $k-\omega$  湍流模型)。两相流模型选择根据粒子加载率。粒子加载率对相之间的影响具有很大的作用。颗粒加载率定义为离散相的质量密度和载体相的质量密度之比，

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (3-1)$$

物质密度比为：

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (3-2)$$

气-固两相流中它大于 1000，液-固两相流中在 1 左右，而气-液两相流中小于 0.001。利用这些参数，就可以估计粒子相中粒子之间的平均间隔距离。下面是由 Crowe et al.给出的一种估计方法：

表 3-2 AIJ 计算模型边界条件设置  
 Fig. 3-2 Configuration of computation model of AIJ

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 入口边界条件 | <p>指数率风速剖面，表达式为：<math>U/U_{ref} = (z/z_{ref})^\alpha</math>，其中<br/> <math>\alpha = 0.25</math>，<math>z_{ref} = 0.1\text{m}</math>，<math>U_{ref} = 5\text{m/s}</math><br/>                     湍流强度沿高度变化公式：<br/> <math display="block">I = \begin{cases} 0.23, &amp; z \leq z_b \\ 0.1(z/z_g)^{-0.2} &amp; z_b &lt; z \leq z_g \\ 0.1 &amp; z &gt; z_g \end{cases}</math>                     其中 <math>z_b = 5\text{m}</math>，<math>z_g = 450\text{m}</math><br/>                     湍动能 <math>k</math> 及湍流耗散率 <math>\varepsilon</math> 或者湍流频率 <math>\omega</math> 的公式：<math>k = 1.5(\bar{u} \cdot I)^2</math><br/> <math display="block">\varepsilon = C_\mu^{0.75} \frac{k^{1.5}}{l} \quad \omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} l} \quad \text{其中 } C_\mu = 0.09</math><br/>                     湍流积分尺度：<math>l = 100(z/30)^{0.5}</math><br/>                     对风速，湍动能 <math>k</math> 和湍流耗散率 <math>\varepsilon</math> 和湍流频率 <math>\omega</math> 在入流处的分布均采用 UDF 编程与 FLUENT 作接口实现，详见附录 1。</p> |
| 出口边界条件 | 压力出口(outflow)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 壁面边界条件 | 无滑移壁面(wall)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 参考压力位置 | (-270m, 0, -270m)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

$$\frac{L}{d_d} = \left( \frac{\pi}{6} \frac{1 + \kappa}{\kappa} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-3)$$

$$\kappa = \frac{\beta}{\gamma} \quad (3-4)$$

根据粒子加载率不同，相之间的影响程度可以分为三类<sup>[43]</sup>：对于低加载率，相之间的耦合作用是单向的；就是说，作为载体的流体介质可以通过推动和涡漩影响粒子的运动，但是粒子对流体运动却没有影响。离散相，混合物以及欧拉模型都可以很好的处理这一类问题。对于中等的加载率，耦合作用成为双向的；就是说，流体通过推动和涡漩影响粒子运动的同时粒子反过来也通过消耗平均动量和涡漩来影响流动。离散相，混合物和欧拉模型都可以应用于这种情况，但是需要考虑其他的一些影响因素来决定采用何种模型更为合适。对于高加载率，在双向影响的基础上还有粒子压力和由粒子引起的粘性应力的耦合(是双向的耦合)，只有欧拉模型才能正确的处理此类问题了。

对于分散相有着宽广的分布，Mixture 模型是最可取的。如果分散相只集中

在区域的一部分，应当使用 Euler 模型。Mixture 模型比 Euler 模型要少求解一部分方程，所以 Mixture 模型计算量较少，计算稳定性也好一些，容易收敛。

根据节 3.2 介绍过的气象统计资料，北京风沙天气大气气溶胶质量浓度： $11494.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (取近二十年来浓度最高的一次)。粒子加载率，

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} = \frac{11494.7 \times 10^{-6}}{1.29} = 8910.62 \times 10^{-6} \quad (3-5)$$

$$\kappa = \frac{\beta}{\gamma} = 4.789 \times 10^{-6} \quad (3-6)$$

$$\frac{L}{d_d} = \left( \frac{\pi}{6} \frac{1+\kappa}{\kappa} \right)^{\frac{1}{3}} = 47.8 \quad (3-7)$$

因此粒子就可以看成相互孤立的 (也就是说，粒子加载率很低)。对于体积率小于 10% 的粒子负载流问题，应采用离散相模型。但是由于离散相模型中粒子运行轨迹的计算是独立的，即在参考坐标系下跟踪每一个颗粒的运行轨迹，计算消耗极大，实验室目前的硬件设备无法完成。因此，采用混合模型进行模拟。混合模型是一种简化的多相流模型，它求解混合相的动量、连续性和能量方程，第二相的 volume fraction 方程，以及相对速度的代数方程，相比之下计算消耗要小得多。

(2) 混合物第二相设置 假定颗粒为均匀球体；颗粒速度与风场速度相同，没有相对滑移；颗粒在空间均匀分布，不随高度变化<sup>[43]</sup>。具体的参数设置如表 3-3 所示。

表 3-3 颗粒相参数设置  
Fig. 3-3 Configuration of particle phase

| 地区 | 平均粒径,<br>$\mu\text{m}$ | 折算密度,<br>$\text{g}/\text{cm}^3$ | 沙粒体积分数<br>%               | 大气气溶胶质量浓度,<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
|----|------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| 北京 | 5.0                    | 3.33                            | $3.451862 \times 10^{-7}$ | $1.14947 \times 10^4$                  |
| 甘肃 | 6.444                  | 3.17                            | $3.208201 \times 10^{-5}$ | $1.01700 \times 10^6$                  |

### 3.3.6 求解参数的设置

流体介质是空气，具有不可压缩性，密度为常数，材料参数选用缺省值。



不考虑热交换，即屏蔽能量方程。对流项迎风格式采用 QUICK 格式，流场求解方法采用 SIMPLEC 算法。压力欠松弛系数取 0.3，其他采用缺省值。

### 3.3.7 数值模拟结果与对比分析

(1) 平均风压系数 在 AIJ 模型屋盖水平面布置 24 个测点作为压力测点位置。AIJ 模型尺寸、屋盖压力测点布置如图 3-3 所示。

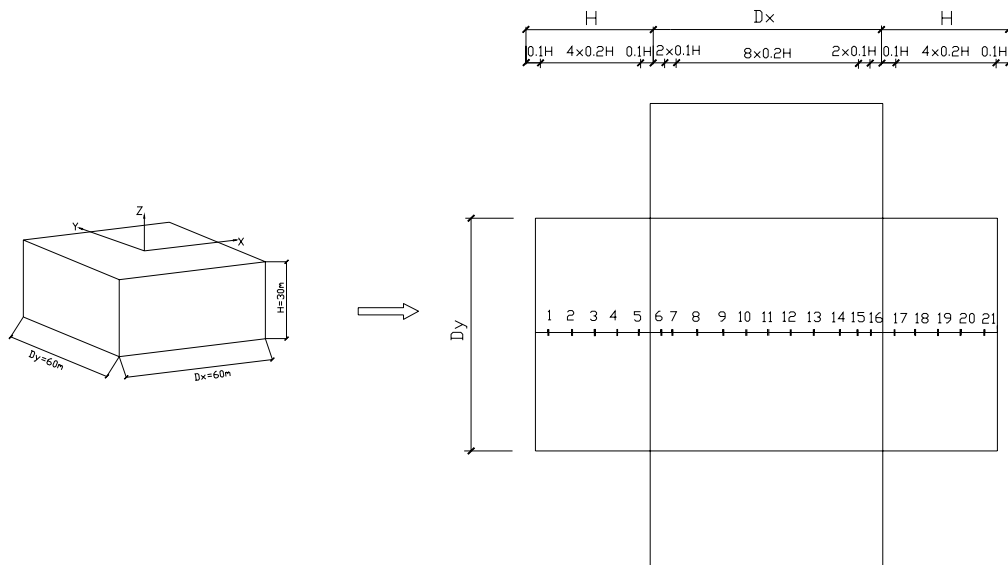


图 3-3 AIJ 全尺度模型及屋盖压力测点布置图

Fig. 3-3 AIJ full scale model and the distribution of pressure tubes

当沙粒浓度为  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，速度  $V = 5\text{m/s}$  时，净风风洞试验，净风模拟结果与挟沙风模拟结果的风压系数比较如图 3-4 所示。

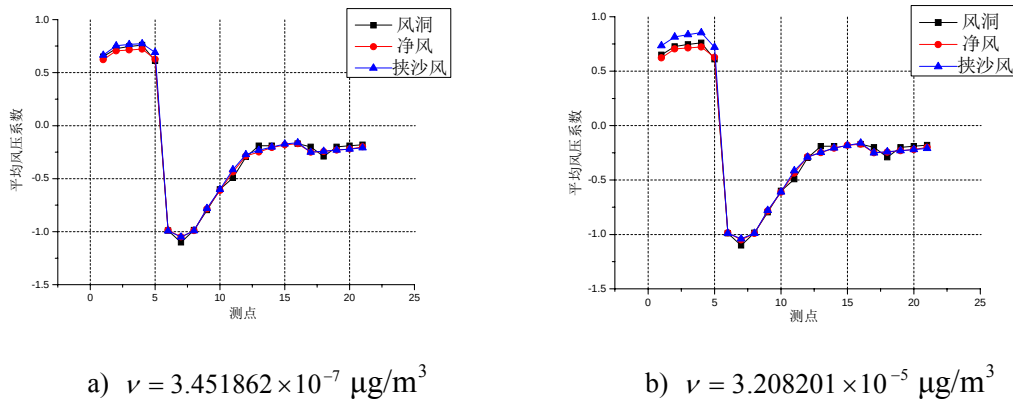


图 3-4  $V = 5 \text{ m/s}$ ，测点平均风压系数

Fig. 3-4  $V = 5 \text{ m/s}$ ，mean pressure coefficients on the surface points

下面分析不同沙粒浓度对建筑物表面风压的影响，当入口速度  $V = 5 \text{ m/s}$ ，沙粒浓度分别为  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$  时，风压系数如图 3-5 所示。

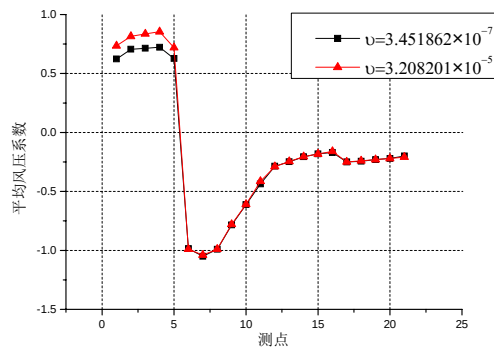


图 3-5  $V = 5 \text{ m/s}$ ，测点平均风压系数

Fig. 3-5  $V = 5 \text{ m/s}$ ，mean pressure coefficients on the surface points

从图中可以看出：

1) 净风与风洞试验比较，在迎风面、屋盖前沿，模拟结果都同试验结果取得了良好的一致关系。在背风面，与屋盖后沿的位置，模拟结果与风洞试验存在一定的偏差，风压系数一般相差在 0.05 左右。总体来讲，模拟结果与风洞试验结果吻合的较好。

2) 净风与挟沙风比较，沙粒的作用主要集中在迎风面，当沙粒浓度较低，净风和挟沙风作用下建筑物表面的风荷载没有显著变化，沙粒浓度为  $10^{-7}$  数量级

时，风压系数大约增加了 6%；当沙粒浓度较高时，净风和挟沙风作用下建筑物表面的风压系数变化显著，沙粒浓度为  $10^{-5}$  数量级时，风压系数大约增加了 15%。

3) 对于屋盖，侧面与背风面，净风作用与挟沙风作用下风压系数没有明显变化。对于背风面，净风作用与挟沙风作用下风压系数呈现不规则变化，但变化幅值很小。

(2) 沙粒沉积 当沙粒浓度很高时，在建筑物背风面存在沙粒的沉积现象。AIJ 模型沙粒相的体积分数分布如图 3-6 所示。

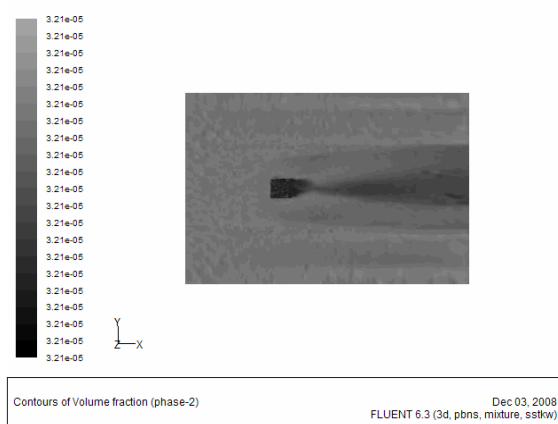
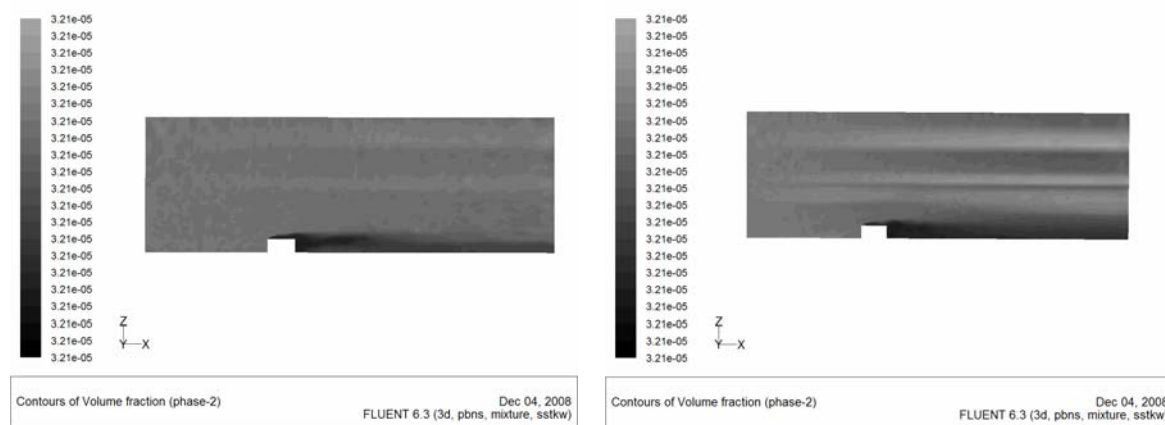


图 3-6 第二相体积分数

Fig. 3-6 The volume fraction of phase 2

从图中可知，建筑物背面是颗粒沉积的主要部位，建筑物侧面的下部也存在沙粒沉积现象，但分布很小且浓度不高。对于迎风面，没有明显的沙粒沉积现象。

当沙粒浓度相同，入口速度不同时，沙粒的分布云图如图 3-7 所示。



a)  $V = 5\text{m/s}$ b)  $V = 10\text{m/s}$ 

图 3-7 沙粒浓度分布云图

Fig. 3-7 The contour map of the volume fraction

从沙粒的分布云图可以看出：入口流速不同时，迎风面粒子分布情况相似，但是背风面粒子分布情况随流速有所变化。入口速度较小时，颗粒浓度较高的区域集中在试件背风面，当流速增大时，颗粒逐渐向出口方向扩散，这一现象说明：流速越高，颗粒越不容易沉积。但是试件背风面沉积量受到流速的影响并不明显。两种工况下，背风面处颗粒分布的平均体积浓度差别只有 0.25%。

### 3.4 CAARC 模型风沙影响的数值模拟

#### 3.4.1 数值建模及求解参数的选取

CAARC 模型最初是由 Wardlaw 和 Moss(1965) 在联邦航空咨询委员会 (CAARC: Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) 协调会议上提出的一种标准高层建筑模型，用来检验各个模拟自然风的风洞的实验结果。CAARC 高层建筑标准模型是一全尺度尺寸为  $30.48(D_x) \times 45.72(D_y) \times 182.88(H)\text{m}^3$  的矩形柱体，表面平整，无任何附属物，并同时规定在模型  $2/3H$  高度水平面布置 20 个压力测点作为标准的压力测点位置。本文中计算模型的网格亦采用非结构混合网格，得到网格节点数为 798483 个，体单元数为 1568112 个。CAARC 模型的网格布置如图 3-8 所示。

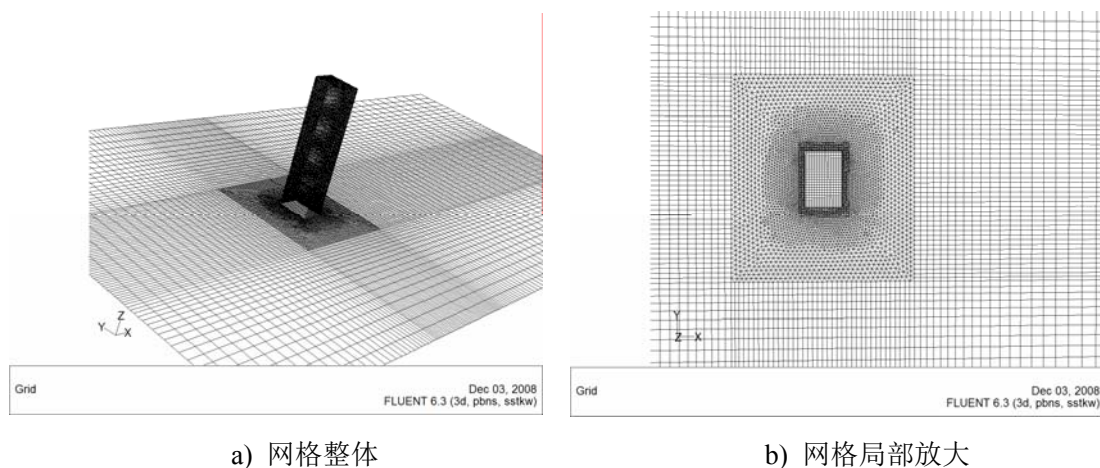


图 3-8 计算模型网格

Fig. 3-8 Computation model's mesh grid

为保证模拟结果的真实性和准确性，本文采用计算流域的尺寸为 $X=2H+1D_x+5H$ 、 $Y=1.5H+1D_y+1.5H$ 、 $Z=1H+1.5H$ ，将建筑放置在计算流域入口约 1/3 处，出口边界位于建筑物高度 5 倍的地方，以保证流动达到充分发展状态。CAARC 模型的计算流域如图 3-9 所示。

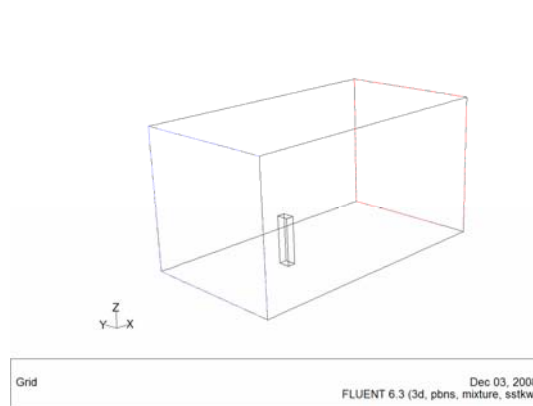


图 3-9 模型计算流域

Fig. 3-9 The scale of computation model

CAARC 计算模型具体参数的设置如表 3-3 所示<sup>[44]</sup>。其他参数设置与 AIJ 模型相同，具体参见前节表 3-2。

表 3-3 CAARC 计算模型参数设置  
Table 3-3 Configuration of computation model of CAARC

|        |                                                                                                                             |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 模型尺寸   | $30.48(D_x)\text{m} \times 45.72(D_y)\text{m} \times 182.88(H)\text{m}$                                                     |
| 计算域尺寸  | $X=2H+1D_x+5H$ 、 $Y=1.5H+1D_y+1.5H$ 、 $Z=1H+1.5H$<br>其中 X 为顺风向，Y 为横风向，Z 为高度方向                                               |
| 网格方案   | 非结构网格，网格单元数为 1568112 个                                                                                                      |
| 入口边界条件 | 指数率风速剖面，表达式为： $U/U_{ref} = (z/z_{ref})^\alpha$ ，其中 $\alpha = 0.3$ ， $z_{ref} = 0.6096\text{m}$ ， $U_{ref} = 12.7\text{m/s}$ |

### 3.4.2 数值模拟结果与对比分析

(1) **平均风压系数** 在模型  $2/3H$  高度水平面布置 20 个测点作为压力测点位置。本文将 Fluent 中的模拟结果同在同济大学 TJ-2 风洞的采用 1:300 的缩尺模型结果进行了比较分析, 其中模型尺寸及入口风速剖面的设置都与该风洞试验相同。定义来流风垂直吹向 CAARC 模型 6-10 测点所在的面, 风向角为  $0^\circ$ , 按顺时针方向增加, CAARC 模型、表面压力测点布置如图 3-10 所示。

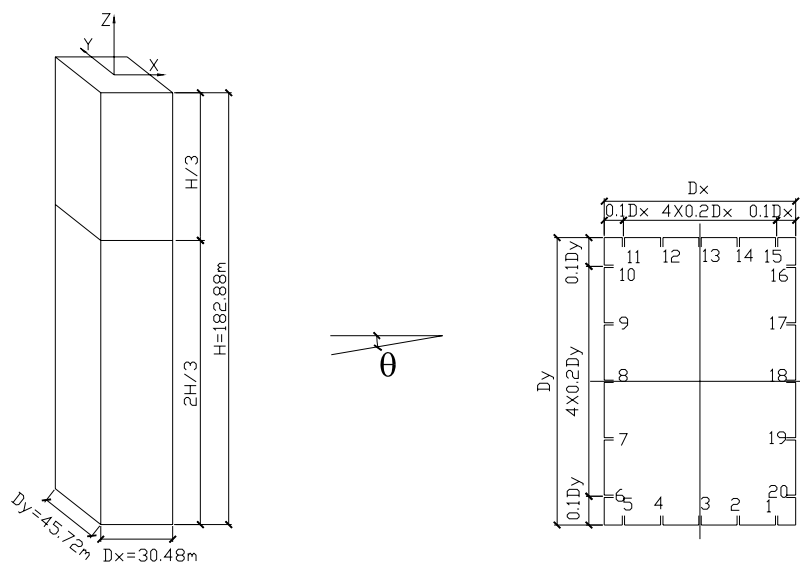


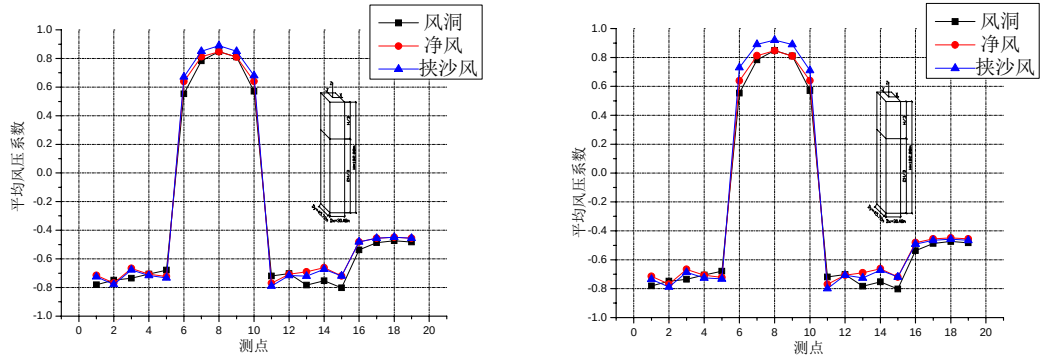
图 3-10 CAARC 全尺度模型及压力测点布置图(模型  $2/3H$  高处)

Fig. 3-10 CAARC full scale model and the distribution of pressure tubes

沙粒浓度分别为  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \text{ 时 } \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,

对净风的风洞试验结果与模拟的净风与挟沙风风压系数进行比较。 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  三个风向下 20 个测点的平均风压系数的分布曲线如图 3-12、3-14、3-15 所示。

风向为  $0^\circ$  角时, 净风风洞试验, 净风模拟结果与挟沙风模拟结果的风压系数如图 3-11 所示。



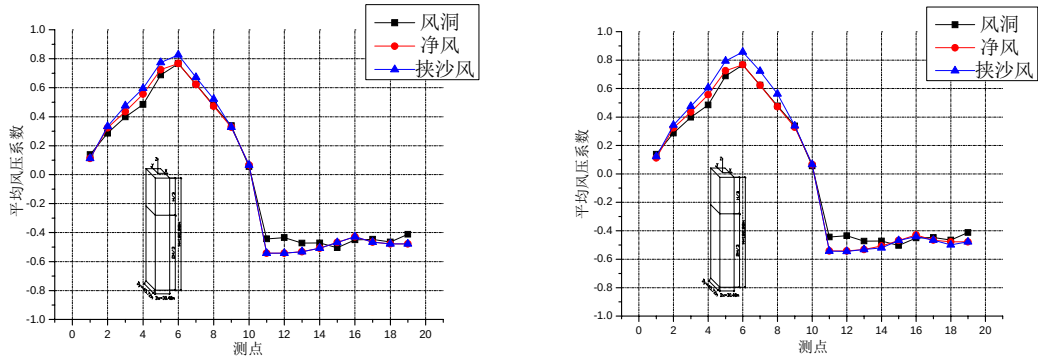
a)  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$

b)  $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$

图 3-11 0°风向，测点平均风压系数

Fig. 3-11 0° wind angle, mean pressure coefficients on the surface points

风向为 45°角时，净风风洞试验，净风模拟结果与挟沙风模拟结果的风压系数如图 3-12 所示。



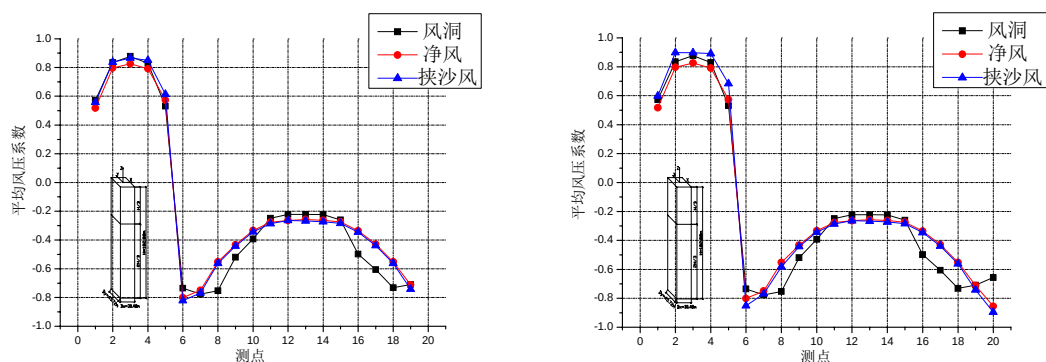
a)  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$

b)  $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$

图 3-12 45°风向，测点平均风压系数

Fig. 3-12 45° wind angle, mean pressure coefficients on the surface points

风向为 90°角时，净风风洞试验，净风模拟结果与挟沙风模拟结果的风压系数如图 3-13 所示。



a)  $\nu = 3.451862 \times 10^{-7} \mu\text{g}/\text{m}^3$

b)  $\nu = 3.208201 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$

图 3-13 90°风向，测点平均风压系数

Fig. 3-13 90° wind angle, mean pressure coefficients on the surface points

从图中可以得出以下几点结论：

- 1) 沙粒的作用主要集中在迎风面，当沙粒浓度较低时，风压系数的变化不明显。当沙粒浓度较高时，各风向下的迎风面的风压系数有明显变化，迎风面风压系数增加了 15% 左右。
- 2) 在背风面负压绝对值与试验结果有一定偏差，风压系数一般相差在 0.1 左右，挟沙风与静风作用下的风压系数变化不明显。
- 3) 在侧面则是模拟结果的负压绝对值小于试验结果，误差在 0.15 左右，相比较而言，挟沙风与静风作用下的风压系数变化不明显。
- 4) 随着风向改变模拟结果的大体趋势均是迎风面风压增加，背风面与侧面无明显变化，证明本文模拟方法适用于各种风向。

(2) **沙粒沉积** 当沙粒浓度较高时，建筑物周围存在明显的沙粒沉积现象。CAARC 模型沙粒相的体积分数分布如图 3-14 所示。



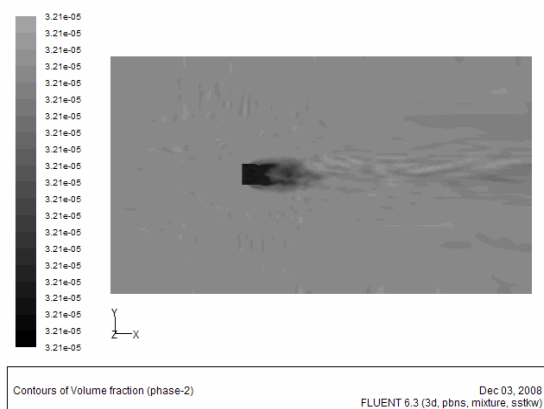


图 3-14 第二相体积分数

Fig. 3-14 The volume fraction of phase 2

与 AIJ 模型相似，建筑物背面是颗粒沉积的主要部位。当沙粒浓度相同，入口速度不同时，沙粒的分布云图如图 3-15 所示。

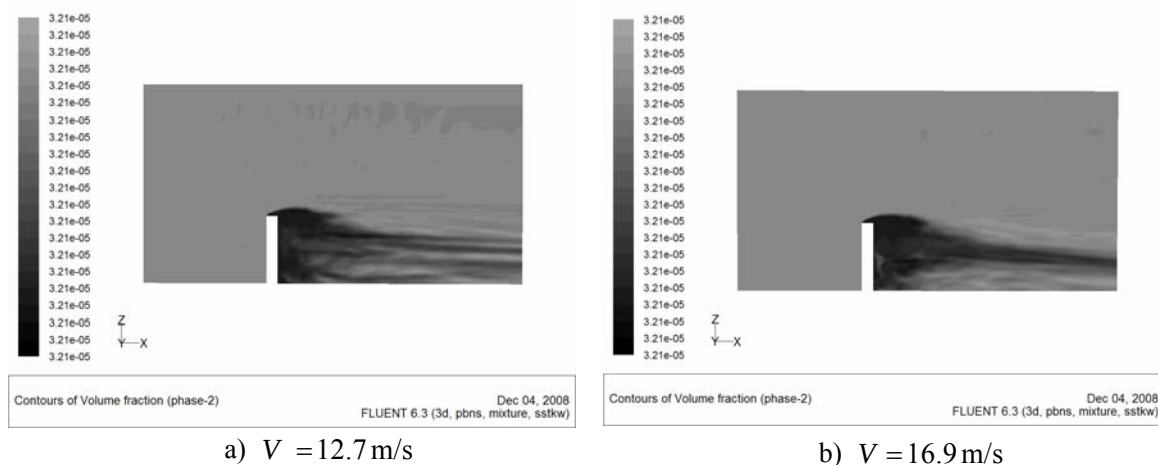


图 3-15 沙粒浓度分布云图

Fig. 3-15 The contour map of the volume fraction

从沙粒的分布云图可以得到与 AIJ 模型相似的结论：入口流速不同时，迎风面粒子分布情况相似，但是背风面粒子分布情况随流速有所变化。入口速度较小时，颗粒浓度较高的区域集中在试件背风面，当流速增大时，颗粒逐渐向出口方向扩散，这一现象说明：流速越高，颗粒越不容易沉积。但试件背风面沉积量受到流速的影响并不明显，两种风速下，沙粒浓度相差 6% 左右。

此外，对于高层结构，随着高度的增大，建筑物背面颗粒扩散的程度亦逐渐增大，不同高度处沙粒浓度分布云图如图 3-16 所示。

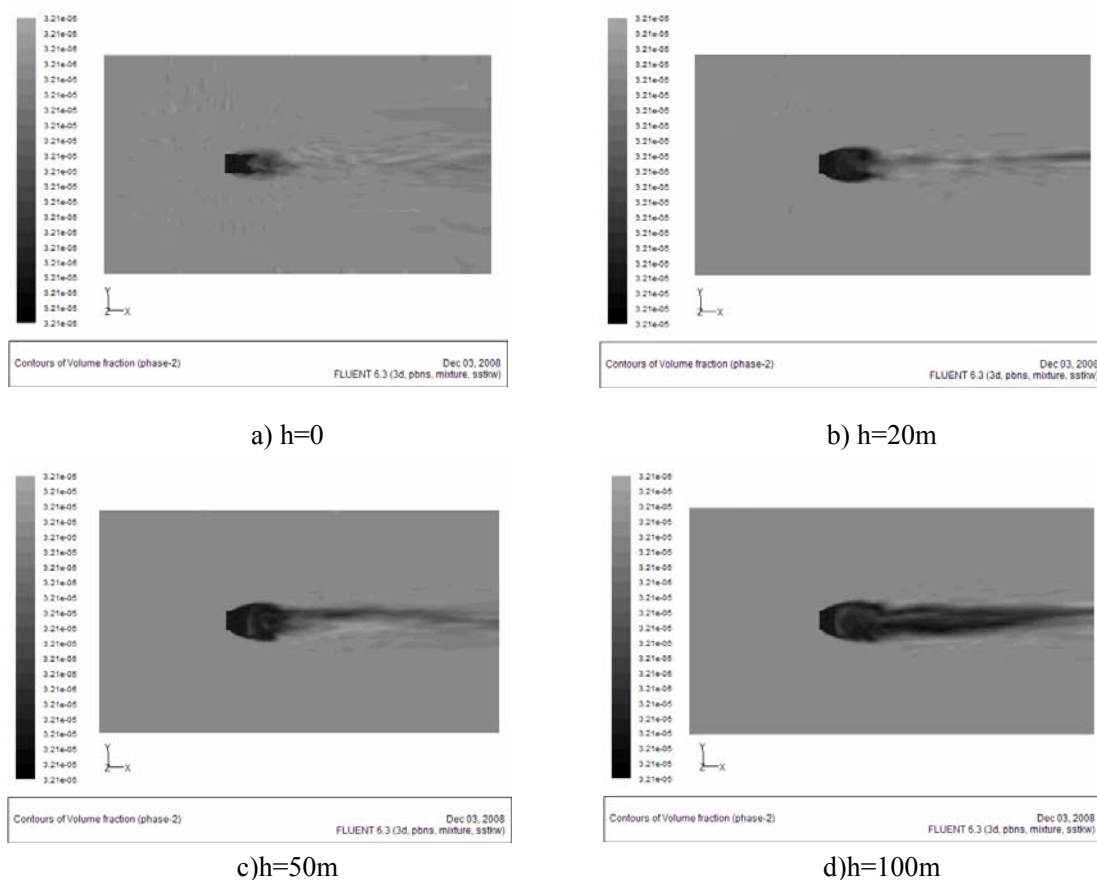


图 3-16 不同高度处沙粒浓度分布云图

Fig. 3-16 The contour map of the volume fraction of different height

### 3.5 本章小结

本章首先介绍了我国沙尘暴天气的时空分布特征，根据沙尘暴天气统计资料，分别选取了 1990 年 4 月 25 日发生在北京的沙尘暴，大气气溶胶质量浓度为近二十年来最高的一次： $1.14947 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[38]</sup>。1993 年 5 月 5 日 15 时 42 分，甘肃河西走廊的金昌出现的黑风暴天气，当地的气溶胶的质量浓度达  $1.017 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，以此作为依据设置相应的参数。然后将两种标准模型的数值模拟结果作对比分析，分别对两种模型在净风作用和挟沙风作用下的风荷载作了对比研究。此外，还对沙粒浓度较高时，建筑物周围产生的沙粒沉积现象作了具体分析，得到了以下结论：

- 1) 两种模型的净风数值模拟结果与风洞试验结果均吻合的较好。迎风面的模拟结果与风洞试验结果有非常好的一致性。对于大跨度平面屋盖结构，侧面与背风面的风压系数偏差在0.05左右。对于高层结构，侧面与背风面的风压系数偏差在0.1左右。
- 2) 当沙粒浓度较低时，即浓度在 $10^{-7}$ 的数量级，对于大跨度平面屋盖结构和高层结构，净风和挟沙风作用下建筑物表面的风荷载没有显著变化。可以大体看出，对于大跨度平面屋盖结构和高层结构，风压系数的变化主要是在迎风面，变化的幅值不大。
- 3) 当沙粒浓度较高时，即浓度在 $10^{-5}$ 的数量级，对于两种模型，净风和挟沙风作用下建筑物表面的风荷载有显著变化。对于大跨度平面屋盖结构和高层结构，风压系数的变化主要是在迎风面。而侧面与背风面均没有明显变化。
- 4) 在两种模型的背风面存在着沙粒沉积现象。当沙粒浓度相同时，风速越大，建筑物背风面的沙粒浓度越小，但变化幅值不大。在建筑物的迎风面，沙粒浓度较均匀，风速的变化和沙粒体积浓度的变化对建筑物迎风面的沙粒浓度均没有明显影响。对于高层结构，随着高度的增加，在建筑物背风面的沙粒扩散现象越来越显著。

## 结 论

近年来,由于环境条件的恶化,在我国的北方尤其是西北,扬沙和沙尘暴天气日益增多,风夹带着沙尘,将可能对建筑物的表面风压力产生不利影响,在土木工程领域,研究风沙运动对建筑物的影响目前还很少见。本文在研究了风沙两相流数值模拟方法的基础之上,使用通用商业 CFD 软件 Fluent,采用了发生在北京与甘肃地区两次强沙尘暴天气为背景,模拟了典型结构:大跨平面屋盖建筑和高层建筑物的静风荷载分布和挟沙风荷载分布。本文有以下主要结论:

1) 对于大跨度平面屋盖模型(AIJ模型)和高层建筑模型(CAARC)模型,当沙粒浓度较低时,即浓度在  $10^{-7}$  的数量级时(相当于北京地区典型沙尘暴天气),挟沙风作用下建筑物表面的风压系数比净风作用增大 5-6%左右;当沙粒浓度在  $10^{-5}$  的数量级时(相当于甘肃地区最强沙尘暴天气),挟沙风作用下建筑物表面的风压系数比净风作用增大 15-18%左右;风压系数的变化主要是出现在建筑物迎风面,侧面与背风面均没有明显变化。

2) 在两种模型的背风面存在着沙粒沉积现象。当沙粒浓度相同时,风速越大,建筑物背风面的沙粒浓度越小,但变化幅值不大。在建筑物的迎风面,沙粒浓度较均匀,风速的变化和沙粒体积浓度的变化对建筑物迎风面的沙粒浓度均没有明显影响。对于高层结构,随着高度的增加,在建筑物背风面的沙粒扩散现象越来越显著。

本文所采用的两相流模拟方法是把沙粒相当作连续介质考虑,即把沙粒相也当作流体进行计算。在实际的沙尘暴过程中,沙粒相是离散的介质,并且沙粒分布极不均匀。每一次沙尘过程,沙粒的粒径分布,大气气溶胶的质量浓度,沙尘沉积物质量浓度,沙粒的化学元素含量等风沙两相流的特征均存在着很大差异。由于对风沙运动研究得较少,对于沙尘暴期间风沙流的结构尚无研究结论,因此在本文中对于沙尘暴的风沙流结构只作了粗略的模拟,与实际的风沙过程存在差异。

## 参考文献

- 1 王式功, 杨德保, 金炯, 徐启运, 杨瑜峰. 我国西北地区黑风暴的成因和对策. 中国沙漠. 1995, 15(1):19~30
- 2 A. D. Gosman. Developments in CFD for Industrial and Environmental Application in Wind Engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1999, 81:21~39
- 3 T. Stathopoulos. Computational Wind Engineering: Past Achievements and Future Challenges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997, 67-68:509~532
- 4 Y. Cheng, F. S. Lien. A Comparison of Large Eddy Simulations with a Standard  $k-\varepsilon$  Reynolds-Averaged Navier-Stokes Model for the Prediction of a Fully Developed Turbulent Flow over a Matrix of Cubes. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2003, 91:1301~1328
- 5 杨伟, 顾明. 高层建筑三维定常风场数值模拟. 同济大学学报. 2003, 31(6):647~651
- 6 马剑. 群体建筑风环境的数值研究. 浙江大学硕士学位论文. 2006
- 7 周晷毅, 顾明, 李雪峰. 大跨屋盖表面风致雪压分布规律研究. 建筑结构学报. 2008, 29(2):7~12
- 8 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势. 力学进展. 1995, 25(3):369~382
- 9 R. A. Bagnold. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen. 1941:101~105
- 10 R. S. Anderson, P. K. Haff. Wind Modification and Bed Response during Saltation of Sand in Air. Acta Mechanica. 1991, suppl.1:21~51
- 11 T. Nikimi, H. Kamiya, M. Horio. Numerical Simulation of Cohesive Powder Behavior in a Fluid Dynamic. Chemical Engineering Science. 1998, 53(10): 1927~1940
- 12 周芳, 祁海鹰, 由长福, 徐旭常. 有限空间风沙流动数值模拟及边界条件问题. 清华大学学报. 2004, 44(8):20~37
- 13 亢力强, 郭烈锦. 风沙跃移中颗粒冲击起动的数值模拟. 自然科学进展. 2005, 15(2):252~256

- 14 于涛, 李萌堂, 郭毅, 李军. 悬移层风沙运动数值模拟. 干旱区地理. 2004, 27(3):347~351
- 15 R. S. A. Anderson. Theoretical Model of Eolian Impact Ripples. *Sedimentology*. 1987, 34:943-956
- 16 买买提明. 艾尼, 阿布都克力木. 阿布都热合曼, 苏白. 阿那尔别克. 风沙流动与沙纹生成数值模拟分析. 第十八届全国水动力学研讨会文集. 2004
- 17 A. D. Howard. Sand Transport Model of Barchan Dune Equilibrium. *Sedimentology*. 1985, 25:307~338
- 18 W. S. Weng. Air Flow and Sand Transport over Sand Dunes. *Acta.Mech. suppl.* 1991, 2:1~24
- 19 L. Berkofsky. The Prediction of Dust Erosion by Wind: an Interactive Model. 1994, 67:385~406
- 20 D. L. Westphal. A case Study of Mobilization and Transport of Sahara Dust. *Journal of the Atmospheric Science*. 1988, 45:2145~2175
- 21 倪晋仁, 李振山. 风沙两相流理论及其应用. 北京:科学出版社. 1985:8~10
- 22 吴世亮. 风沙流中沙粒跃移规律研究. 北京大学硕士研究生论文. 2001
- 23 刘振兴, 董治宝, 陈广庭. 风沙运动数值模拟研究的进展. 干旱区研究. 1997, 14(1):63~68
- 24 朱久江. 风沙两相跃移层中沙粒相的速度分布. 力学学报. 2001, 33(1)
- 25 董治宝, 慕青松, 王洪涛. 风沙流中风速廓线的数值模拟与实验验证. 气象学报. 2008, 66(2):158~166
- 26 刘东生. 黄土与环境. 北京:科学出版社. 1985:61~62
- 27 黄滢. 基于 FLUENT 软件的建筑物风场数值模拟. 华中科技大学硕士学位论文. 2005
- 28 傅德薰. 流体力学数值模拟. 北京:国防工业出版社. 1993
- 29 S. Joussaume. Three\_Dimensional Simulation of the Atmosphere Cycle of Dust Particles Using a General Circulation Model. *J.Geophy.* 1990, 95(2):1909~1941
- 30 S. Rubinow, J. Keller. The Transverse Force on a Spinning Sphere Moving in a Viscous Fluid. *Journal of Fluid Mechincs.* 1961, 11:447~459
- 31 赵斌娟, 袁寿其, 刘厚林, 黄忠富, 谈明高. 基于 Mixture 多相流模型计算双流道泵全流道内固液两相湍流. 农业工程学报. 2008, 24(1):7~12
- 32 李健. 河道采砂影响的数值模拟研究. 长江科学院硕士学位论文. 2008
- 33 周力行, 陈文芳译. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟. 北京科学

出版社. 1994

- 34 T. Littmann. Dust Storm Frequence in Asia: Climatic Control and Variability. Inter Journal of Climatol. 1991, 11:393~412
- 35 B. T. Werner. A Steady State Model of Wind-Blown Sand Transport. Journal of Geology. 1990, 98:1~17
- 36 王小玲, 瞿盘茂. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. 气象学报. 2004, 62(1):96~102
- 37 徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征. 应用气象学报. 1996, 7(4):439~482
- 38 杨东贞, 颜鹏, 徐祥德. 北京风沙天气的气溶胶特征. 应用气象学报. 2002, 13:185~194
- 39 唐国利, 巢清尘. 近48年中国沙尘暴的时空分布特征及其变化. 应用气象学报. 2005, 16:128~132
- 40 兰州现代特大尘暴沉积物粒度特征及其意义. 兰州大学学报. 1995, 31(4):168~174
- 41 Architectural Institute of Japan. Numerical Prediction of Wind Loading on Buildings and Structures. 1998
- 42 郭毅, 李萌堂, 李军. 非均匀沙风沙运动悬移层数值模拟. 干旱区资源与环境. 2004, 18(4):34~38
- 43 P. G. Staffman. The Lift on a Small Sphere in a Slow Shere Flow. Journal of Fluid Mechincs. 1965, 22:385~400
- 44 黄鹏, 罗攀, 顾明. 高层建筑标准模型风洞测压和测力试验研究. 第十二届全国风工程学术会议论文集. 西安, 2005:240~244

## 附录 1

### UDF自编程序

#### ◆ AIJ

/\* UDF of specifying steady-state exponent velocity profile boundary \*/

#include "udf.h"

#define a 0.3

#define height 0.1

#define v\_height 5

#define Cu 0.09

#define Zg 450.0

#define Zb 5.0

#define VKC 0.41

#define scale 1.0

#define TLC1 100.0

#define TLC2 30.0

double Velocity\_Profile(double z)

{

double V;

if(z<=Zg)

V=v\_height\*pow((z/height),a);

else

V=v\_height\*pow((Zg/height),a);

return(V);

}

double Turb\_Intensity(double z)

{



```

double TI;
if(z<=Zb)
    TI=0.23;
else if((z>Zb)&&(z<=Zg))
    TI=0.100*pow((z/Zg),-0.2);
else
    TI=0;
return(TI);
}

double Turb_Length(double z)
{
    double TL;
    if(z<=Zb)
        TL=TLC1/scale*pow((Zb/TLC2),0.5);
    else
        TL=TLC1/scale*pow((z/TLC2),0.5);
    return(TL);
}

DEFINE_PROFILE(v_profile, thread, index)
{

    real x[ND_ND];
    real z,V;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        F_PROFILE(f, thread, index)=V;
    }
}

```

```

    }
    end_f_loop(f, thread)
}

/* profile for kinetic energy */
DEFINE_PROFILE(k_profile, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z, V, TI;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        F_PROFILE(f, thread, index)=1.5*pow((V*TI), 2);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

/* profile for dissipation rate */
DEFINE_PROFILE(epsilon_profile, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z, V, TI, TKE, TL;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];

```

```

        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        TKE=1.5*pow((V*TI),2);
        TL=Turb_Length(z);/*Message("%g\n",TL);*/
        F_PROFILE(f,thread,index)=pow(Cu,0.75)*pow(TKE,1.5)/TL;
    }

    end_f_loop(f,thread)
}

/* profile for omega */
DEFINE_PROFILE(omega_profile,thread,index)
{
    real x[ND_ND];
    real z,V,TI,TKE,TL;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x,f,thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        TKE=1.5*pow((V*TI),2);
        TL=Turb_Length(z);
        F_PROFILE(f,thread,index)=1000*pow(TKE,0.5)/(pow(Cu,0.25)*TL);
    }

    end_f_loop(f,thread)
}

```

## ◆ CAARC

/\* UDF of specifying steady-state exponent velocity profile boundary \*/

#include "udf.h"

#define a 0.3

#define height 0.6096

#define v\_height 12.7

#define Cu 0.09

#define Zg 450.0

#define Zb 5.0

#define VKC 0.41

#define scale 1.0

#define TLC1 100.0

#define TLC2 30.0

double Velocity\_Profile(double z)

{

double V;

if(z<=Zg)

V=v\_height\*pow((z/height),a);

else

V=v\_height\*pow((Zg/height),a);

return(V);

}

double Turb\_Intensity(double z)

{

double TI;

if(z<=Zb)

TI=0.23;

```

else if((z>Zb)&&(z<=Zg))
    TI=0.100*pow((z/Zg),-0.2);
else
    TI=0;
return(TI);
}

double Turb_Length(double z)
{
    double TL;
    if(z<=Zb)
        TL=TLC1/scale*pow((Zb/TLC2),0.5);
    else
        TL=TLC1/scale*pow((z/TLC2),0.5);
    return(TL);
}

DEFINE_PROFILE(v_profile, thread, index)
{

    real x[ND_ND];
    real z,V;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        F_PROFILE(f, thread, index)=V;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

```

/* profile for kinetic energy */
DEFINE_PROFILE(k_profile, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z, V, TI;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        F_PROFILE(f, thread, index)=1.5*pow((V*TI), 2);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

/* profile for dissipation rate */
DEFINE_PROFILE(epsilon_profile, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z, V, TI, TKE, TL;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        TKE=1.5*pow((V*TI), 2);
    }
}

```

```

        TL=Turb_Length(z);/*Message("%g\n", TL);*/
        F_PROFILE(f, thread, index)=pow(Cu, 0.75)*pow(TKE, 1.5)/TL;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

/* profile for omega */
DEFINE_PROFILE(omega_profile, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z, V, TI, TKE, TL;
    face_t f;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        z=scale*x[2];
        V=Velocity_Profile(z);
        TI=Turb_Intensity(z);
        TKE=1.5*pow((V*TI), 2);
        TL=Turb_Length(z);
        F_PROFILE(f, thread, index)=1000*pow(TKE, 0.5)/(pow(Cu, 0.25)*TL);
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

## 哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于 FLUENT 的建筑物风沙两相流场数值模拟》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字：

日期： 年 月 日

## 哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

《基于 FLUENT 的建筑物风沙两相流场数值模拟》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于(请在以上相应方框内打“√”)：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日



## 致 谢

首先向我的导师肖仪清教授致以衷心的感谢。本文的研究工作是在肖老师的悉心指导下完成的。在两年半的硕士研究生学习期间，导师渊博的知识、严谨的治学态度令我钦佩，在课题的研究过程中导师给予的指导也让我受益匪浅。

特别感谢师兄李朝在论文进展中给予的指导和帮助，使我的论文能够顺利完成。感谢深圳研究生院的同学罗春夏、徐娜、渠玉香、朱磊、袁大器、赵岩、王海洋，是你们在学习和生活中给予我的帮助才使本文能够顺利完成。感谢所有给予我帮助和指导的老师、同学和朋友。感谢我的父母，感谢他们二十多年来对我的养育之恩，是他们的支持推动着我不断前进。

在此向辛勤培育我成长的母校、老师和领导们致以由衷的感谢和崇高的敬意，感谢祖国和人民对我多年的教育和培养。

本文的研究得到了国家自然科学基金项目：土木工程相关的近地台风特性观测研究(项目批准号：50578057)的资助，在此表示感谢。

张默

2008年12月