

摘 要

近年来我国大城市机动车保有量以每年高于 17% 的速度增长, 给我国经济带来繁荣的同时, 也对城市大气环境造成了严重的污染。大量研究表明, 机动车排气污染已经成为我国一些大城市大气污染的主要来源, 在城市街道内机动车排放污染直接造成了空气的恶化。

机动车排放污染物在街道内的扩散过程是一个复杂的过程, 受很多因素的影响, 主要包括排放源强、气象因素和地形条件等因素。论文以典型交通干道为研究对象, 分析研究了机动车排放污染的现状 & 特征。重点研究了风向、风速因素和街道布局对机动车排放 CO 污染物在街道中扩散的影响。

利用数值模拟方法研究了微尺度街道峡谷范围内街谷几何结构及街道两侧建筑物对街谷内流场及机动车排放污染物扩散规律的影响, 采用 CFD 软件 Fluent 建立三条街道两个十字路口的三维街道模型, 模拟了 2 种风向、2 种风速条件下街区风场和 CO 浓度场分布的情况。结果表明, 十字路口的建筑物布局与风向、风速共同作用, 会对街区的风场和 CO 浓度场分布产生很大影响, 街谷内有强弱不同的反方向涡旋存在, 街谷内污染物扩散水平从强到弱依次为迎风面建筑物强于背风面建筑物。模拟结果表明, 把 CFD 用于街区大气环境问题研究有着良好前景。

关键词: 城市街道峡谷, 计算流体力学 (CFD), 数值模拟, 风速场, 浓度场

Abstract

These years the number of the vehicles of the big cities in China is increasing with the high speed of 17%. It brings prosperity to the economy, but it also contributes much to the air pollution in big cities. According to the results of much research, vehicular exhaust is the main source of the air pollution in big cities and it directly leads to the deterioration of air quality in streets.

It's a complicated process for the vehicular exhaust to disperse in street canyon. Many factors may affect this process such as the source intensity, meteorological factors and street geometry and so on. Typical street model is built in thesis as the objects of this study. Then the characteristics and the current situation of vehicle emission are explored. Emphasis is put on how wind velocity 、 wind direction and street layout affect the dispersion process of the vehicular co pollutants in streets.

The diffusive characteristics of vehicle emission pollutant and the wind field characteristics in urban street canyons depend on street canyon ration of height to width, A and the symmetry of building height. In this article ,a numerical model was used to study the relationship between street canyon characteristics and diffusive and wind characteristics. By using of Fluent CFD software, a 3-d two intersection model of three streets is set. The wind velocity distribution and CO concentration distribution near the intersection are simulated under 2 wind direction and 2 wind velocity conditions. The result of the modeling shows that the layout of the structures 、 the wind direction and the wind velocity can jointly affect the distribution of the wind velocity and the CO concentration. The stable vortexes from strong to weak strength are formed within the urban street canyon. The diffusive levels of the pollutant from urban street canyons are the street canyons in which the building in windward are higher than that of in leeward. The study of this thesis also shows that the modeling result of Fluent is reasonable and the application prospect of Fluent on atmospheric environment issues in urban streets is good.

Keywords: Urban street canyon, Computational Fluid Dynamics (CFD) ,
Numerical Simulation, Wind field, Concentration field

西南交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，
同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子
版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南交通大学可以将本学位
论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、
缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密□，在5年解密后适用本授权书；
2. 不保密☒，适用本授权书。

学位论文作者签名：张利

指导教师签名：张利

日期：2008.6.5

日期：2008.6.5

西南交通大学

学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其它个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

张利

日期：2008 年 6 月 5 日

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景及目的意义

1.1.1 研究背景

随着城市机动车数量的增加和各国政府法规对城市工业源的限制,城市污染源构成发生了很大变化,机动车尾气污染已经成为城市污染物的重要来源。进入 20 世纪 90 年代后,在一些发达国家,城市交通已经成为城市空气污染的首要影响因素。自 1950 年以来,全球机动车数量增长了十倍,据估测,到 2030 年间,机动车保有量将比现在再增加一倍。车辆的增加主要出现在发展中国家及东欧。^[1]在中国,由于人口增长、经济发展及城市化进程的不断加快,全国机动车保有量也随之快速增长。截至 2003 年底,全国个人汽车保有量为 12427672 辆,比 2002 年增加 2472450 辆,增长率为 24.8%。虽然目前我国机动车保有量和国外相比并不高,但这些车辆主要集中于城市交通和人口集中度高的大城市,加之我国机动车的污染控制水平普遍相对落后,因此机动车的平均排放水平要比美国等发达国家高得多。同时,配套的交通基础设施建设和交通规划管理却未能与机动车的高速增长同步发展,造成目前许多大城市机动车的日平均车速较低,城市中心区许多重要道路长时间处于饱和状态,加速、减速、怠速等不利工况频繁发生,造成中国大中城市的空气污染已经逐渐由煤烟型污染转化为交通型污染。交通空气污染已经成为城市环境的主要问题之一。^[2]

我国由于机动车保有量的快速增长,机动车污染物排放总量持续攀升。2003 年全国机动车碳氢化合物(HC)、一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO_x)排放量分别达到 836.1 万吨、3639.8 万吨和 549.2 万吨,比 1995 年增加了 2.51 倍、2.05 倍和 3.01 倍。而在此期间,其他污染源向大气排放的主要污染物平均下降了 15%左右,机动车排放污染物对环境空气质量的影响正在日益增强。^[3]尽管目前我国的大气污染仍以煤烟型为主,但从环境变化的趋势分析,如果不能有效控制机动车污染,到 2010 年,我国 661 个城市中的 400 个左右的城市环境空气污染可能从煤烟型转化为煤烟型与机动车污染型的混合型污染。^[4]

经过一些资料的查阅收集,就中国经济、交通最发达的几个城市对其日益严重的机动车尾气污染现象进行一些数据量化的对比分析。例如:上海 1995 年机动车一氧化碳(CO)排放量与 80 年代末期相比增加了 2.3 倍,非甲烷烃(NMHC)增加了 0.95 倍,氮氧化物(NO_x)增加了 3.2 倍。^[6] 1997 年机动车每年排放的 CO 增加到 38 万吨, NMHC 排放量上升至 10.0 万吨,而 NO_x 排放量增加到 8.15 万吨。^[7] 随着上海市经济的发展,轿车保有量将进一步增加,1994 年上海市私人购车的数量为 4026 辆,1996 年增至 6016 辆,年增加率将近 25%。^[8] 一辆轿车每年排出的有毒废气比轿车本身重量大 3 倍^[9],机动车排放的污染物总量仍有增加的趋势。随着污染物总量的增加,上海市道路网空气中污染物的浓度进一步增大。机动车尾气污染排放分担率,广州市 1994 年 CO 机动车排放分担率占 88.8%;北京市 1999 年为 73.5%,上海市 1998 年机动车排放的 CO 就占到了总排放的 64%。^[10] 机动车尾气中另外两种主要污染物 NO_x 、HC 的排在总排放量中的分担率也非常高,1994 年广州机动车对 NO_x 的排放分担率为 79.3%。^[11] 2000 年上海市机动车排放的 NO_x 占各类污染源排放总量的 74%以上。^[12] 研究发现,机动车保有量与 NO_x 浓度具有明显的相关性。^[13] 由于机动车拥有量的快速增长而引起的 NO_x 污染已有可能代替煤烟型污染。1995 年 6 月在上海出现光化学烟雾, NO_x 已经成为上海市的首要污染物。^[14]

在世界上许多区域,夏季都可以观测到高浓度的光化学氧化剂。尤其在墨西哥、Sao Paulo、洛杉矶、雅典、柏林及其他许多主要的欧洲城市。据估计,在大多数欧洲城市中,道路交通贡献了 40% 的 VOC, 70% 多的 NO_x , 90% 多的 CO。^[15]

因此,机动车尾气所造成的环境污染越来越为人们所关注。

1.1.2 研究目的和意义

我国目前汽车单车排放水平现状仅相当于国外 70 年代中期水平,单车污染物排放比国际水平高出数 10 倍。^[16] 表 1.1 给出了我国和美国机动车污染物排放系数的比较。现有汽车 90% 以上是国产车,由于排放控制技术落后,在同样运行工况下,国产车较发达国家同类产品排放量高几倍甚至几十倍,加上交通管理手段落后,在用车检查维修制度不完善,城市交通道路拥挤和市内居民集中,大量车况恶劣的车辆继续行驶,更加剧了污染物的排放。国产

车平均日排污量为 0.6-0.9kg。^[10]与国外同类车型相比,国产汽车的油耗一般高 20%-30%,国产机动车油耗量大,排放的污染物也多。以小轿车为例,我国国产车的 HC, CO 和 NO_x 的排放量分别是 1992 年美国新车排放量的 14.5 倍、11.8 倍和 3.3 倍。^[10]

表 1-1 我国和美国机动车污染物排放系数比较

单位: (g/km)

污染物	国别	汽油轿车	轻型汽油车	重型汽油车	重型柴油车	摩托车
HC	中国	10.2	11.4	17.0	9.4	4.8
	美国	2.5	2.8	8.4	2.1	4.0
CO	中国	85.2	84.8	235.6	31.3	47.2
	美国	19.0	24.0	102.0	11.5	24.2
NO _x	中国	1.6	3.2	5.0	53.4	0.5
	美国	1.0	1.2	3.1	10.2	0.4

以上海市为例,2000 年全市 NO_x 年均浓度 0.056 毫克/立方米,比 1995 年上升了 10%;城区和郊县 NO_x 年均浓度为 0.090 毫克/立方米和 0.032 毫克/立方米,分别比 1995 年上升了 23%和 39%(上海市机车污染综合防治领导小组办公室,2000)。根据上海市交通所预测,到 2020 年上海市机动车保有量将达到 200-350 万辆,是 2000 年的 2-4 倍。可以预见如果不采取措施加以控制,上海市大气环境势必进一步恶化。根据国外机动车发展经验可知,当人均国内生产总值达到 3000 美元以上时,轿车将成为机动车保有量增长的主要方向。在我国,汽车工业的发展不仅预示和带动国民经济的腾飞,同时,人民生活水平的提高也急切期待现代化便捷交通方式的到来和家庭汽车的普及,机动车在今后相当长时间内将保持快速增长的趋势。

因此,定量评估机动车尾气污染物排放水平,研究不同车型、不同区域、采用不同措施下机动车对污染物的排放量,以及道路交通污染物排放后的扩散状况,对于确定机动车污染控制措施和交通管理政策,定量评估多种方案对机动车污染减排的效果,提出最为有效的机动车发展管理措施,将直接影响我国城市空气质量改善的进程。

目前模拟计算街道机动车污染扩散有两种方法:其一是不考虑污染源所在街道的流场,仅考虑在一定风速、风向及气象条件下,整个道路作为污染源对临近地区的影响,这是城市尺度的街道交通污染扩散研究,可用于计算城区开阔地带或城郊公路及高速公路的交通排污在道路沿线的浓度分布;其

二是在街道两旁都有高大建筑物的情况下,考虑街道内的空气流动对传输和扩散的影响,考虑排放源、气象条件 and 环境因素等的影响,形成的一种小尺度污染扩散过程,称为街道峡谷污染扩散,主要用于计算市区内已形成街道峡谷的繁忙交通路线的街道内部及街道上空的交通污染的浓度分布、扩散过程及其消散过程。本文的研究主要是第二种小尺度的街道峡谷污染扩散研究。由于主干道承担着城市交通运输的重要任务,是比较大的机动车污染源,因此本文虚拟一个城市的主干道进行研究,主要关注主干道两侧人行道 2 米高度由于机动车污染对行人造成的影响。

由于机动车排放高度接近人的呼吸带,因而污染物直接影响行人及周围建筑物内人群的健康。街道中污染物的扩散主要受气象条件和街道几何形状的影响,另外受到街道车流量即排放源强的影响较大。而每个城市的气象条件和街道几何形状都有自身的特点,受路况的影响,车流量变化规律也各有不同,造成污染物的扩散规律也有各自的特征。因此非常有必要研究街道中污染物的产生因素和扩散迁移规律,从而提出减少机动车对街道人群污染的控制措施。

本论文利用商业 CFD 软件 Fluent 建立三条街道交叉构成的两个十字路口的三维计算模型,考虑 2 种不同风向条件(与主街道成 0 度、45 度角)和 2 种不同的风速条件(城市的平均风速和最大风速),对计算结果进行分析,弄清楚模拟的城市峡谷中在不同的气象条件下气流场的扩散轨迹和机动车排放的 CO 污染物的扩散轨迹。希望本论文的研究可以为城市交通道路建设项目环境影响评价和城市规划部门提供参考,对道路机动车尾气污染的实际情况采取相应的控制措施,做到有的放矢,为管理部门控制机动车尾气污染提供理论依据。

1.2 国内外研究现状及进展

1.2.1 国外研究动态

国外学者从上世纪 60 年代开始研究街道峡谷(指两侧都有连续的高大建筑物的相对狭长的街道,见图 1-1)内大气流场及其近空的污染状况,先后建立了一些模型来模拟计算街道峡谷内流场的分布及污染物的浓度分布。城市

街道峡谷污染模式着重反映了污染物在街道峡谷内部的传输、扩散及消散的运动规律。

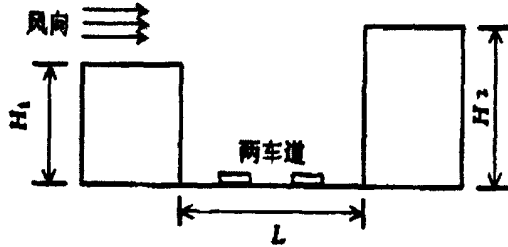


图 1-1 典型街道的结构示意图

城市街道峡谷非数值模式主要是在过去 20 年内,发展起来的经验半经验模式、箱模式和高斯扩散模式。

斯坦福研究中心(SRI)于 1973 年提出了一个街道峡谷模式 SRI 用来预测峡谷内的空气质量。^[10]Nicholson 开发的箱模式。^[11]Yamartino 等^[20]通过对城市街渠内流场和湍流场的描述发展了一个峡谷烟羽箱模式(CPBM),该模式含有箱模式和高斯型模式的特征。Berkowicz 发展了 OSPM 模式^[21],认为受点的污染物浓度主要是由扩散的浓度和由于街渠内气流涡旋造成污染物循环形成的浓度构成。对于直接扩散造成的污染物浓度,采用简单高斯烟羽模式计算,将排放源处理成一系列垂直于风向的微小有限长线源,污染物循环引起的浓度采用简单的箱模式。这个模式在对丹麦、挪威、荷兰、英国街渠污染物的逐时预报中都得到了满意的结果,随后 Buckland 应用以前一些模式的结果发展了一套 AEOLIUS 模式。^[22]

城市街道峡谷数值模式是随着计算机技术和计算技术的迅速发展而发展起来的。计算流体力学(CFD)已从最初的简单应用发展到今天应用于解决复杂的实际工程问题。流体力学中描述流体运动的核心是 Navier-Stokes 方程,各种数值模式都建立在该方程基础之上,可以针对不同的研究对象做不同的简化得到各自适用的模型。在街道峡谷扩散模型中,由于流体速度较低,流体均被视为不可压缩的。

就湍流场而言,城市街道峡谷内空气扩散与开阔平坦的公路也有很大不同。Depaul 等^[23]所做的一个外场试验使人们对风向垂直于街渠情况下污染物的扩散理解有了飞跃性的发展。Hotchkiss 等^[24]人用 MAC 法求解三维风速场,将粒子法应用于污染物质的扩散模拟。日本机械学会于 70 年代初开发出

APPS 模式,含有处理峡谷内浓度分布的 APPS-RDM 和处理道路交叉点周围浓度分布的 APPS-LDM 子模式。1995 年 Zoumakis^[20]应用街道峡谷内和街道峡谷上面测量的空气污染物浓度,研究城市环境中机动车车辆污染物浓度的垂直廓线。Liu 等^[21]发展了一套可以用于街渠峡谷的空气质量随机模式,该模式包含两部分:一个是根据街渠屋顶风速得出街谷内部流场分布的风场模式,一个是 Monte Carlo 扩散模式,但是这个模式只能用于与街渠垂直风向情况下的模拟。对于复杂街渠而言,这种气象与扩散耦合模式具有很好的发展前景。近年来 Murakami 等^[22]采用 K- ϵ 模式和 LES(Large Eddy Simulation 大涡模拟)等湍流模式,开发了用差分法求解三维风速场和浓度场的模式。Jean 等^[23]在模拟无限长的非对称街道峡谷污染物浓度分布时,根据近地层经典假设和标准 K- ϵ 两方程模型,建立了一个数值模式,研究了街道内和屋顶上大气污染物迁移和垂直方向上的交换。模式计算时考虑了能量方程,详细地分析了街道污染物的热力学特性。研究表明街道峡谷内部的温度分布对污染物的输送和扩散有着较大的影响,街道表面热源的不同会使街道内部流场结构从单一的涡旋向多个涡旋转变。同时还给出了污染物浓度分布与峡谷结构间的关系。Liu 等^[24]应用大涡模拟来描述城市街渠的流场和湍流结构,并且模拟了污染物在街渠中的输送机制,发现大涡模拟结果与风洞试验的结果相吻合。

流体力学发展至今,已有多种商用软件问世,较流行的有英国 CHAM 公司的 PHOENICS,美国航空航天局主持开发的 CFX 和在城市大气污染扩散研究中运用较多的美国 Fluent 公司的 Fluent 等。Hasson 采用 PHOENICS 计算了在街道峡谷两旁建筑物等高的情况下,不同高宽比时街道内部的二维浓度场和速度场。该计算采用 K- ϵ 模型,并作了适当简化,且没有考虑能量方程,结果表明该方法具有一定的可行性。目前 Fluent 被广泛应用于与流体力学相关的航天、水运、汽车制造、工程设计等各个行业,其良好模拟性能享有盛誉。Capeluto 等曾利用 Fluent 评估一个拟建城市商业区设计的合理性,并取得了很好效果。^[25]Chang 等曾将 Fluent 的模拟结果和风洞实验结果进行比较,发现 Fluent 模拟结果与风洞实验模拟的街道峡谷内风场和污染物浓度场的观测结果吻合得很好。^[26]这说明,将 Fluent 用于街区的大气环境研究是可行的。

1.2.2 国内研究动态

国内这方面的研究尚处于起步阶段。但仍有不少学者就国外模型在国内

实际应用上做出了有益的尝试,并且利用计算流体力学(CFD)软件,对街区峡谷进行了数值模拟和研究。

金均等^[14]利用 320 国道某段的实测数据,对采用高斯线源模式预测开阔公路尾气扩散的可靠性进行了验证。结果证明在有风条件下对于源参数(主要是源的初始扩散宽度和风速)进行适当的修正后,可以得到与实际较为符合的结果。龚慧明^[15]利用 CAL3QBCR 模型对北京市崇文门一个开阔的十字路口进行模拟,发现能较好的模拟十字路口的机动车尾气排放的 CO 浓度时空分布。周洪昌等^[16]利用此模型对上海市的几个周围有高大建筑物的十字路口和街道峡谷地区进行模拟却发现和实际结果有很大的差异,认为高斯线源模型不适合街道峡谷地区尾气扩散的模拟和预测,只适合宽阔路段的模拟。

街道十字路口在城市非常普遍,但针对十字路口的空气污染研究还比较少。清华大学的傅立新改进了街谷底层风速的拟合关系,采用 OSPM 模式对北京一街谷中的 CO 和 NO_x 浓度进行了模拟,并取得了较好的结果。^[17]但是目前专门针对十字路口的以流体力学方程为基础的数值模式,还比较少。李磊等^[18]利用 CFD 软件 Fluent 建立了一个三维街道十字路口模型。模拟结果表明,CFD 对所建模型模拟结果合理,用于街区大气环境问题研究有着良好前景。另外,北京大学环境科学中心环境模拟与污染控制国家联合重点实验室在相关方面也展开了大量工作,但是到目前为止还没有形成真正适合我国实际情况的比较独特的成型模式。

随着计算技术和高性能计算机的发展,数值模拟方法越来越多地应用于研究城市街道内部机动车排放物扩散研究中。由于用数值模拟方法可以以较低成本全面分析研究各种街道模型,从而成为理解和掌握城市机动车排放物对环境影响的有力工具。但从公开发表的文献中可以看出,基于三维的数值模拟计算开展的并不广泛,尤其对于一些复杂的街道结构(如十字路口和高架桥)研究的文献更不多见。风洞试验和实地测量数据为数值模拟方法提供了有效的验证手段。在风洞试验方面,随着测量技术的飞速发展,一些先进的测量手段如激光技术也开始逐步应用于街道峡谷内部的流场测量,成为研究城市街道峡谷机动车污染物扩散的又一个有效手段。

1.3 论文研究对象和方法及内容

1.3.1 论文的研究对象

(1) 本文把城市的道路类型划分为主干道、次干道和小巷。

主干道一承担着城市主要客运或货运任务的道路,车流量较大,机动车道宽度为四车道或者更宽,道路中间一般有隔离带。

(2) 按照道路两旁建筑物的高度与道路宽度的比值,将道路划分为街道峡谷和宽阔型道路两类。

街道峡谷一道路两旁建筑物的高度与道路宽度的比值大于或等于 1,这种类型的街道内空气流场比较复杂。

基于以上的划分原则,本论文的研究对象是虚拟的主干道并由于道路两旁建筑物布局而形成的街道峡谷,对峡谷内的空气湍流场和机动车排放的 CO 污染物扩散的浓度场进行分析研究。

1.3.2 论文的研究方法及内容

目前国内外微尺度的街道峡谷交通大气污染物扩散研究主要有三种方法:外场观测、物理模拟和数值计算。^[4] 外场观测是取得街谷扩散研究资料的较好方案,但是其观测计划设计需要很高的技巧,另外该方法对规划项目失效。风洞实验能够对街谷扩散特征进行详细研究,成本较高是其缺点。飞速发展起来的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)恰好克服了前面两种方法的弱点,在计算机上实现一个特定的计算,就好像在计算机上做了一次物理实验。其为实验研究和理论研究都起到的促进作用,也为简化流动模型提供了更多的依据,使很多分析方法得到发展和完善。^[4]并且通过对计算结果的后处理,CFD 软件不仅可以 2D 或 3D 效果来显示计算结果,还可以动态的显示流动效果,使我们更直观、更形象地了解流场情况。

本论文应用 CFD 软件之一的 Fluent 对城市街道峡谷内空气湍流扩散三维数值模拟和峡谷内机动车排放污染物的浓度场的三维数值模拟,研究机动车排放物在城市街道峡谷的扩散规律,可为城市机动车排放控制,交通流量控制,城市街道大气污染的监测、评价及防治提供科学依据。

1.3.3 论文结构和技术路线

本论文共分为五章。

第一章:绪论。本章主要介绍了选题意义、背景及国内外在此领域的研究现状及进展。

第二章:城市街道污染物扩散影响因素及相关气象资料。本章通过对影响机动车城市街道污染扩散因素的分析,从而了解要研究城市机动车污染所需考虑的因素和应该收集的相关气象资料。

第三章:CFD 软件简介与应用。本章主要是对 CFD 软件 FLUENT 原理的介绍,了解构成 FLUENT 主要框架的动量和质量守恒方程及确立湍流闭合计算模式,为建立的三维街道峡谷模型进行数值模拟作必要的理论准备。

第四章:街道峡谷 CFD 数值模拟。本章通过对街道峡谷流场和机动车 CO 污染物浓度场扩散的计算模拟,弄清在设定的不同外界条件下街谷中流场和污染物浓度场的分布情况。

第五章:结论。本章总结了本文研究内容及结果,给出结果讨论及自己对问题的一些构思和发展。

本论文的技术路线如图 1-2 所示。

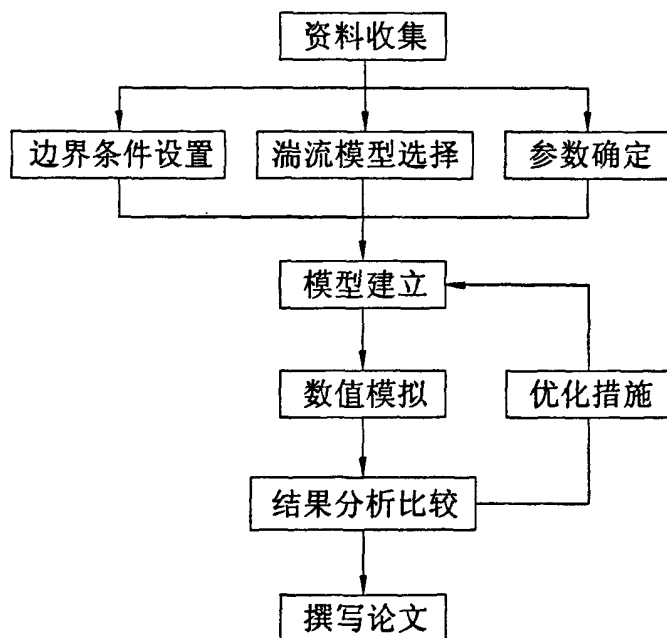


图 1-2 技术路线图

第 2 章 街道污染物扩散影响因素及气象资料

2.1 影响街道机动车污染扩散的气象因素

汽车发动机燃烧产生的污染物排放到大气中以后,在大气中传输扩散。传输扩散受到气象因素和环境因素的影响。当近地面大气处于不易稀释扩散的气象条件时,从机动车排放的大气污染物,将有可能造成高浓度的大气污染;反之,当大气处于易于稀释扩散的气象条件下时,由于排向大气中的污染物能被风和大气湍流迅速的稀释扩散,即使是在与前者相同的源参数条件下,也可能不会造成大气污染。

2.1.1 风速与风向

(1) 风速

风速对大气污染物起冲淡稀释的作用,风速越大,单位时间内混入空气中的清洁空气越多,稀释越快;反之,风速越小,稀释越慢。城市街道汽车污染扩散过程中,最重要的一个特点是街道峡谷对局地流场的影响。由于上层大气会在峡谷内产生一个或多个涡旋,因而使得峡谷内流场完全不同于上层大气。80 年代,很多研究都证实了街道中涡旋回流的存在。Depaul 和 Sheih 于 1985 年在芝加哥的一个街道峡谷中进行了一次示踪实验,结果表明:当环境风速在 $2-5\text{m/s}$ 之间并与道路正交时,街道峡谷中只有一个涡流存在;当风速降低到小于 $1.5-2.0\text{m/s}$ 时,峡谷中的涡流就似乎消失了^[4]。尽管街道峡谷中涡流现象非常复杂,但有一个规律是相同的,即上层大气中风速加大时,峡谷内污染物与上层大气的扩散交换也随之加剧,从而使得峡谷内污染物浓度降低^[4]。在实际观测的资料中也发现当城市主要街道的高宽比一般在 0.5 左右,这样的街道是属于宽阔街道结构,屋顶风容易下洗至街道底部,造成街道底部风速相对较大的情况。

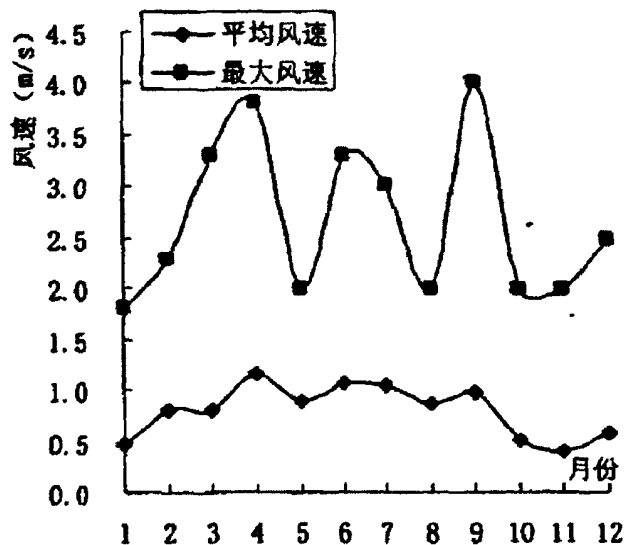


图 2-1 2002 年西安市风速特征变化曲线

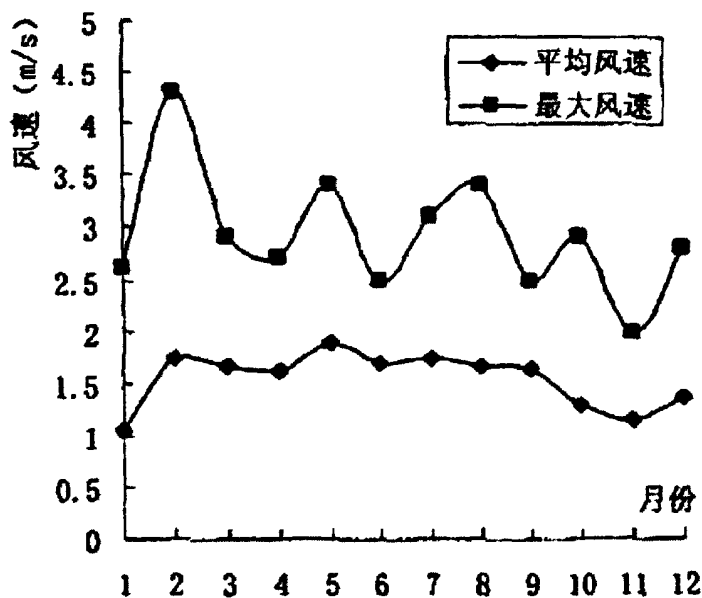


图 2-2 2005 年西安市风速特征变化曲线

我们选择以西安市的实测风速为例^[40]，来观察城市的风速状况变化。较小的风速不利于机动车污染物的扩散稀释，随着城市机动车保有量的增加，机动车污染物排放量逐年递增，机动车城市街区污染问题将成为一个重大的

现实问题。

(2) 风向

风对大气污染物起到的另一个作用是整体输送作用，风向决定了污染物的迁移方向，使得污染源下风向地区比上风向地区污染物浓度高。街道两旁建筑物顶部的风向(屋顶风)对街道内大气污染物扩散有很重要的作用，这是由于不同风向的屋顶风在街道内将产生不同的气流流场。图 2-3 是地面风向的十六方位表示法。经常处于下风向，也就是在十六方位图上处于下风向的频率很高，则高浓度机会多。但小风时，下风向近距离污染最严重。

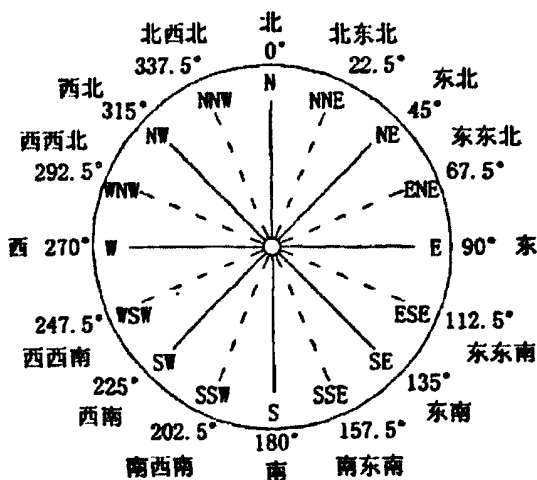


图 2-3 风向的十六方位表示法

本文在后文进行 CFD 模型应用研究时考虑两种不同风向条件（与主街道成 0 度、45 度角）来代表街区的风向状况。

2.1.2 温度

(1) 气温

气温的时间和空间上的变化是引起大气污染物浓度变化的另一个重要气象因素。它与大气稳定度有密切的关系。

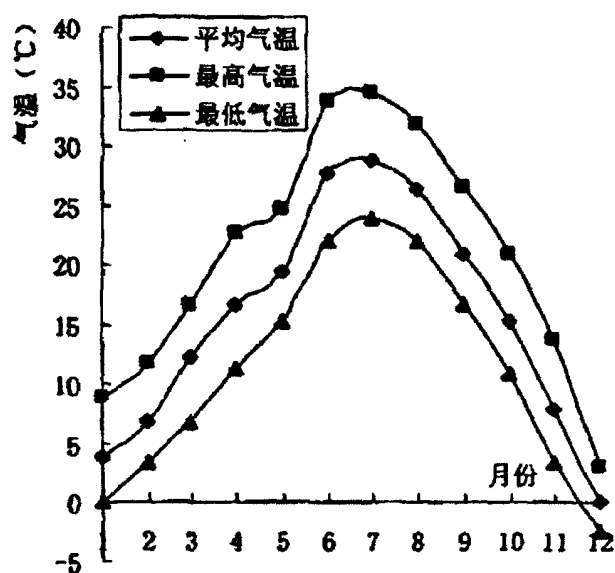


图 2-4 2002 年西安市气温特征变化曲线

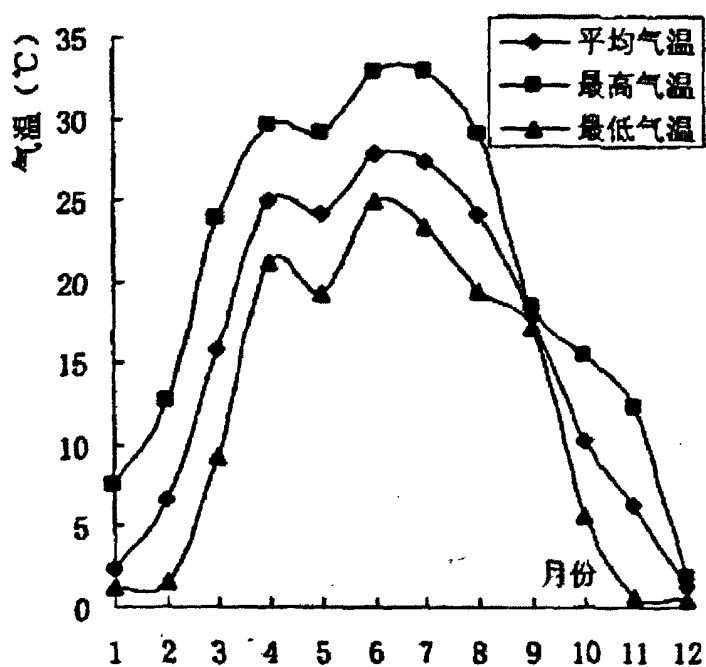


图 2-5 2005 年西安市气温特征变化曲线

上图给出了西安市 2002 年和 2005 年全年平均、最高和最低气温的变化趋势^[44]。从图中可以看出来 2002 年 7 月份平均气温最高, 为 28.82°C , 12 月最低, 为 0.16°C ; 2005 年 6 月份平均气温最高, 为 27.9°C ; 12 月最低, 为 1.3°C 。西安市冬季气温低, 气层稳定, 大气污染物浓度高; 夏季气温高, 气层不稳定, 大气污染物浓度较低。一般来说, 气温的日变化与年季变换一样, 一天中, 白天气温升高, 夜间气温下降, 形成白天大气湍流交换强, 大气污染物浓度低, 夜间气流下沉, 湍流减弱, 大气污染物浓度高。气温的垂直分布, 决定着大气的层结状态, 当气温上高下低时, 层结稳定; 气温上低下高时, 层结不稳定, 湍流扩散强。因此, 气温的时空分布影响着大气污染物的沉积和扩散。

(2) 逆温

在大气对流层中, 正常情况下气温随高度的增加而降低。但是在对流层下层由于气象条件的影响, 有时会出现气温随高度增加而升高的现象, 这种现象称为逆温。某一高度的逆温层就像一个盖子一样阻碍着它下面污染物向外扩散。由于它阻碍了污染物的继续向上运动, 因而可能造成严重污染。

在城市中出现较多、影响最严重的是辐射逆温, 它是由于地面强烈辐射冷却而形成的逆温。在晴朗无云或少云, 风速不大的夜间, 地面很快辐射冷却。贴近地面的气层也随之降温, 空气是自下而上的被冷却。近地层降温多, 离地面越远的气层降温越少。因而形成了自地面向上的逆温, 日落前一小时逆温开始形成, 这时的逆温是和地面相贴的, 称为贴地逆温。随着地面辐射冷却的加剧, 逆温逐渐向上扩展, 黎明时逆温强度最强。日出后, 太阳辐射逐渐加强, 地面随之增温, 逆温便自下而上逐渐消失, 到十点钟左右逆温完全消失。^[45]

污染物在大气中的扩散稀释的动力是风和湍流作用。当无风或风速小时, 湍流对扩散起主要作用, 它直接影响污染物的扩散速率。在逆温情况下, 大气层很稳定, 暖而轻的空气在上面, 冷而重的空气在下面, 这种结构阻碍空气作上升运动, 抑制污染物质输送和扩散。尤其是在日出后的短暂时间内, 地面受热升温, 湍流开始活跃, 逆温层从底部开始破坏, 而上部仍保持逆温状态, 这时积聚在逆温层内的污染物很快向下混合, 形成所谓下扩散型, 致使地面污染物浓度升高。

逆温产生多, 对污染扩散是不利的因素。一般, 城市的逆温以冬季最强, 春季次之, 最弱的为夏季。冬季夜长, 逆温层厚, 强度大, 消失慢, 所以冬

季最不利于机动车污染物的扩散,

2.1.3 大气稳定度

大气稳定度表示空气在铅直方向的稳定程度,即气块是否稳定于原来的层次,是否易于发生对流。它是用来描述环境大气层对于在其中作垂直运动的气团起什么影响的一种热力性质。

大气的污染状况与大气稳定度有着密切的关系。大气不稳定,湍流和对流充分发展,扩散稀释能力强,在同等的排放条件下,一般不会形成大气污染;大气稳定,对流和湍流不容易发展,污染物不容易扩散开,而容易形成大气污染。大气稳定度也有明显的日变化规律,所以导致污染物浓度也有相应的日变化。在一日中,一般清晨和夜间,大气比较稳定,中午 11-14 时大气最不稳定。

莫宁-奥布霍夫长度用来表示大气的稳定程度,定义用 L_{mo} 表示。在白天,由于地表受热,大气处于不稳定状态,这时 L_{mo} 是负值;而在夜间,由于地表辐射冷却,大气处于稳定状态,这时 L_{mo} 是正值。如果它的绝对值接近于零,表明大气非常不稳定(负值时)或非常稳定(正值时)。

莫宁-奥布霍夫长度是与大气层结密切相关的物理参数,定义如下:

$$L_{mo} = \frac{\bar{T}}{g} \frac{u_*^2}{K^2 T^*} \quad (2.1.3)$$

式中: $\bar{T}$ —平均温度;

u_* —摩擦速度;

K —卡门常数,取 0.4;

T^* —一个特征温度。

$L_{mo} > 0$ 时,表示大气层结稳定, $L_{mo} < 0$ 时,表示大气层结不稳定, L_{mo} 趋于无穷大时,表示大气层结为中性。

表 2-1 大气稳定度的对应关系

大气稳定度		L_{∞}	时间和天气状况
稳定层结	>0	大的正值	无云、静稳夜间
		小的正值	微风无云夜间
中性层结	0	≈ 0	强风、黎明、傍晚阴天
不稳定层结	<0	小的负值	多晴朗有风
		大的负值	晴朗微风

2.1.4 大气混合层高度

大气边界层内具有强烈湍流混合作用的大气层顶部高度称之为大气混合层高度。混合层高度也是一个直接影响大气污染物浓度的综合气象参数。混合层高度越高越有利于大气污染物的扩散稀释，污染物浓度就越低，反之，则污染物浓度越高。

从混合层高度来看，大气层内湍流混合作用春夏季比秋冬季强，从这个意义来讲，春夏季有利于机动车污染物的扩散。

2.2 影响街道机动车污染扩散的地理因素

街道的高宽比是描述街道几何特征的一个重要参数，也是影响污染物扩散的重要因素。高宽比较大时，建筑物对风的阻挡作用就大，屋顶风到达街道内时已经减弱，而高宽比较小时屋顶风所遇到的阻挡小，风速损失不大，这样有利于街道内污染物的扩散稀释。

周洪昌等人通过风洞实验^[7]，分析了街道建筑结构对机动车污染物扩散的影响。图 2-6 是在 90° 风向的来流风作用下，4 种典型结构模型街道内测量的示踪气体无量纲浓度等值线图。由图可见街道几何结构对示踪气体的扩散过程有很大的影响。

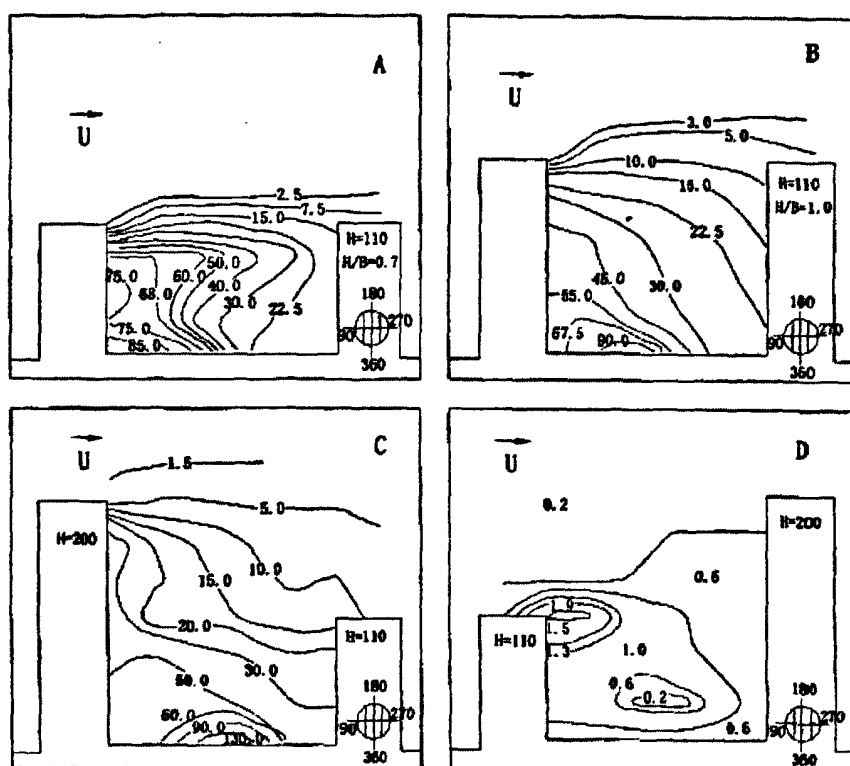


图 2-6 不同结构的街道无量纲浓度等值线图

图 2-6A 是街道两侧等高, H/B (高/宽) $=0.7$ 时, 示踪气体扩散的试验结果。由图可见街道迎风面示踪气体浓度较低, 沿高度方向的梯度变化不大。在街道的背风面浓度较高, 且沿高度方向梯度变化较大, 在背风面下角浓度较高。这是有街道峡谷内的空腔旋涡形成的气流携带了底部高浓度的示踪气体所至。高于街道两侧建筑物后, 示踪气体的浓度很快降低。

图 2-6B 是街道两侧 H/B (高/宽) $=1.0$ 时, 示踪气体扩散过程的实验结果。示踪气体浓度分布形式与图 2-6A 相似。由于建筑模型增高, 示踪气体向街道外部空间扩散的时间与路程增加, 排放源附近示踪气体累积, 浓度增高。

图 2-6C 是下风建筑物明显低于上风建筑物时, 示踪气体浓度分布的典型代表。街道内示踪气体浓度急剧升高。这是由于在较高的上风建筑物后的尾流区内产生气流死区, 示踪气体扩散不利。背风面在很大范围内浓度较高。在下风建筑顶端浓度较低, 随高度增加浓度降低较快。

图 2-6D 代表了下风建筑高于上风建筑时, 示踪气体的典型浓度场。浓度

场结构发生很大的变化。街道内部示踪气体浓度明显降低,且最高浓度点不在排放源附近,而是在上风建筑顶端的背风面上角。这是由于较高的下风建筑物前产生了气流位移区,较强的旋涡形气流迅速将排放源附近的示踪气体吹散,并带至北风上面。在这种几何结构街道污染物扩散能力较强,污染物浓度不会太高。

本次论文我们建立街道两侧 H/B (高/宽) ≥ 1.0 的街道三维模型,采用 CFD 流体力学软件 FLUENT 来对该街道峡谷进行数值模拟,研究讨论街道内空气流场和污染物 (CO) 扩散规律。

2.3 污染源强度的影响

机动车在道路上行驶,排放的废气形成污染源。在气象条件和地形条件不变的情况下,污染源强度越大被稀释所耗费的时间越长。城市街道由机动车污染造成的排放源强由道路车流量、车辆排放因子等因素共同决定。以下是机动车排放源强的表达式:

$$Q = \sum Q_i = \sum_{i=1}^n N_i E_{ij} / 3600$$

式中: Q_i —第 i 条道路上机动车的排放源强, $g/(km \cdot s)$;

N_i —第 i 种车型的车流量, 辆/h;

E_{ij} —第 i 种车型 j 污染物综合排放因子, g/km 辆;

n - 车型分类数;根据具体车型分类定。

由上式可见,机动车的排放源强和街道交通流量与车队整体的综合排放因子成正比关系。根据城市道路的具体情况,可通过控制街道的车流量来减少机动车的排放源强。

本次论文研究讨论街道内污染物 (CO) 扩散规律,不考虑化学变化,模拟中将街道考虑为面源,源强为 $0.61 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,该值是魏雄辉等利用 1997 年北京市的交通状况资料进行估算,得到的一个有实际意义的值^[4]。

2.4 本章小结

本章讨论了气象因素、地理因素和污染源强度三种因素对机动车污染扩散的影响；并且以西安市为例，讨论了在实际进行街区污染研究时应该收集那些有用的数据资料。

(1) 风速、风向等气象因素对街道内污染物的扩散有重要的影响。街道内污染物扩散与屋顶(街道两旁建筑物的顶部)风向密切相关，一般来说上风向由于风的推动作用污染物被带走而浓度低，下风向是污染物的输送方向，浓度将增高。经常处于下风向，也就是在十六方位图上处于下风向的频率很高，则高浓度机会多。但小风时，下风向近距离污染最严重。

(2) 冬季气温低，气层稳定不利于污染的扩散，大气污染物浓度高；夏季气温高，气层不稳定，利于污染物的扩散，大气污染物浓度较低。逆温是机动车污染扩散的不利因素，一般城市的逆温以冬季最强，春季次之，最弱的为夏季，从这个意义来讲冬季不利于机动车污染的扩散。

(3) 大气的污染状况与大气稳定度有着密切的关系。大气不稳定，湍流和对流充分发展，扩散稀释能力强，在同等的排放条件下，一般不会形成大气污染；大气稳定，对流和湍流不容易发展，污染物不容易扩散开，而容易形成大气污染。

(4) 街道的高宽比是描述街道几何特征的一个重要参数。高宽比较大时，建筑物对风的阻挡作用就大，屋顶风到达街道内时已经减弱；高宽比较小时屋顶风所遇到的阻挡小，风速损失不大，这样有利于街道内污染物的扩散稀释。

(5) 城市街道由机动车污染造成的排放源强由道路车流量、车辆排放因子等因素共同决定。在气象、地理和机动车类型等因素不变的情况下，排放源强与街道车流量成正比关系。

第 3 章 湍流模型数值模拟

自然界中的流体流动状态主要有两种形式,即层流(laminar)和湍流(turbulence)。中外许多文献研究表明城市街区的污染物扩散属于湍流扩散过程。本文所建的街区模型通过雷诺数公式计算 $Re > 4000$, 所以其流场也属于湍流扩散, 因此本章我们有必要就湍流动力扩散的控制方程进行描述。

雷诺数公式:

$$R_e = \frac{\rho v d}{\eta}$$

式中 v 为流体流动速度; d 为流场的几何特征尺寸(如管道的直径); ρ 为流体的密度; η 为流体的粘度。

CFD 可以看做是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟, 我们可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)的分布, 以及这些物理量随时间的变化情况, 确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区等。

3.1 流体动力学控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配, 基本的守恒定律包括: 质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流动包含有不同成分(组元)的混合或相互作用, 系统还要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态, 系统还要遵守附加的湍流输运方程。

3.1.1 质量守恒方程

任何流动问题都必须满足质量守恒定律。该定律可表述为: 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。按

照这一定律，可以得出质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1.1.1)$$

在式 (1.1.1) 中， ρ 是密度， t 是时间， u 是速度矢量， u 、 v 和 w 是速度矢量 u 在 x 、 y 和 z 方向的分量。

3.1.2 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为：微元体中流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。该定律实际上是牛顿第二定律。按照这一定律，可导出 x 、 y 和 z 三个方向的动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x \quad (1.2.1a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y \quad (1.2.1b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (1.2.1c)$$

式中， P 是流体微元体上的压力； τ_{xx} 、 τ_{xy} 和 τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量； F_x 、 F_y 和 F_z 是微元体上的体力，若体力只有重力，且 z 轴竖直向上，则 $F_x=0$ ， $F_y=0$ ， $F_z=-\rho g$ 。

式(1.2.1)是对任何类型的流体(包括非牛顿流体)均成立的动量守恒方程。对于牛顿流体粘性应力 τ 与流体的变形率成比例，有：

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div}(u)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div}(u)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div}(u)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right]$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right]$$

式中, μ 是动力粘度, λ 是第二粘度, 一般可取 $\lambda = -2/3$ 。将式代入式(1.2.1), 得:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{ grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (1.2.2a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = \text{div}(\mu \text{ grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (1.2.2b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = \text{div}(\mu \text{ grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (1.2.2c)$$

式中, $\text{grad}() = \partial()/\partial x + \partial()/\partial y + \partial()/\partial z$, 符号 S_u 、 S_v 和 S_w 是动量守恒方程的广义源项, $S_u = F_x + s_x$, $S_v = F_y + s_y$, $S_w = F_z + s_z$, 而其中的 s_x 、 s_y 和 s_z 的表达式如下:

$$s_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \text{ div } u] \quad (1.2.3a)$$

$$s_y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda \text{ div } u] \quad (1.2.3b)$$

$$s_z = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda \text{ div } u] \quad (1.2.3c)$$

一般来讲, s_x , s_y 和 s_z 是小量, 对于粘性为常数的不可压流体, $s_x = s_y = s_z = 0$ 方程(1.2.2)还可写成展开形式:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (1.2.4a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (1.2.4b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w$$

(1.2.4c)

式 (1.2.2) 及 (1.2.4) 是动量守恒方程, 简称动量方程, 也称作运动方程, 还称为 Navier-Stokes 方程。

3.1.3 能量守恒方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为: 微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所做的功。该定律实际是热力学第一定律。

流体的能量 E 通常是内能 i 、动能 $K=1/2(u^2+v^2+w^2)$ 和势能 P 三项之和, 我们可针对总能量 E 建立能量守恒方程。但是, 这样得到的能量守恒方程并不是很好用, 一般是从中扣除动能的变化, 从而得到关于内能 i 的守恒方程。而我们知道, 内能 i 与温度 T 之间存在一定关系, 即 $i=c_p T$, 其中 c_p 是比热容。这样, 我们可得到以温度 T 为变量的能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left[\frac{k}{c_p} \text{grad } T\right] + S_T \quad (1.3.1)$$

该式可写成展开形式,

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right] - \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z}\right] + S_T \quad (1.3.2)$$

其中, c_p 是比热容, T 为温度, k 为流体的传热系数, S_T 为流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分, 有时简称 S_T 为粘性耗散项。常将式 (1.3.1) 或式 (1.3.2) 简称为能量方程。

综合各基本方程, 发现有 u 、 v 、 w 、 P 、 T 和 ρ 六个未知量, 还需要补充一个联系 P 和 ρ 的状态方程, 方程组才能封闭:

$$p=p(\rho, T) \quad (1.3.3)$$

该状态方程对理想气体有

$$P=\rho R T$$

其中 R 是摩尔气体常数。

3.1.4 组分质量守恒方程

在一个特定的系统中,可能存在质的交换,或者存在多种化学组分,每一种组分都需要遵守组分质量守恒定律。对于一个确定的系统而言,组分质量守恒定律可表述为:系统内某种化学组分质量对时间的变化率,等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。

根据组分质量守恒定律,可写出组分 s 的组分质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}(D_s \text{grad}(\rho c_s)) + S_s \quad (1.4.1)$$

式中 c_s 为组分 s 的体积浓度, ρc_s 是该组分的质量浓度, D_s 为该组分的扩散系数, S_s 为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量,即生产率。上式左侧第一项、第二项、右侧第一项和第二项,分别称为时间变化率、对流项、扩散项和反应项。各组分质量守恒方程之和就是连续方程,因为 $\sum S_s = 0$ 。因此,如果共有 z 个组分,那么只有 $z-1$ 个独立的

组分质量守恒方程。将组分守恒方程各项展开,式 (1.4.1) 可改写为:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_s u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_s v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_s w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial z} \right] + S_s \quad (1.4.2)$$

组分质量守恒方程常简称为组分方程。一种组分的质量守恒方程实际就是一个浓度传输方程。当水流或空气在流动过程中挟带有某种污染物质时,污染物质在流动情况下除有分子扩散外还会随流传输,即传输过程包括对流和扩散两部分,污染物质的浓度随时间和空间变化。因此,组分方程在有些情况下称为浓度传输方程,或浓度方程。

3.1.5 控制方程的通用形式

为了便于对各控制方程进行分析,并用同一程序对各控制方程进行求解,现建立各基本控制方程的通用形式。比较四个基本的控制方程,可以看出,尽管这些方程中因变量各不相同,但它们均反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质。如果 ϕ 表示通用变量,则上述各控制方程都可以表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial z}\right] + S$$

(1.5.1)

式中， ϕ 为通用变量，可以代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量； Γ 为广义扩散系数； S 为广义源项。式中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。对于特定的方程， ϕ 、 Γ 和 S 具有特定的形式，表 3.1.5 给出了三个符号与各特定方程的对应关系。

表 3.1.5 通用控制方程中各符号的具体形式

符号 方程	ϕ	Γ	S
质量方程	1	0	0
动量方程	u_i	ρ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i$
能量方程	T	k/c	S_T
组分方程	c_s	$D_s\rho$	S_s

所有控制方程都可经过适当的数学处理，将方程中的因变量、时变项、对流项和扩散项写成标准形式，然后将方程右端的其余各项集中在一起定义为源项，从而化为通用微分方程，我们只需要考虑通用微分方程（1.5.1）的数值解，写出求解方程（1.5.1）的源程序，就足以求解不同类型的流体流动及传热问题。对于不同的 ϕ ，只要重复调用该程序，并给定 Γ 和 S 的适当表达式以及适当的初始条件和边界条件，便可求解。

3.2 三维湍流数值模拟方法简介

湍流流动是自然界常见的流动现象，在多数工程问题中流体的流动往往处于湍流状态，湍动特性在工程中占有重要的地位，因此，湍流研究一直被研究者高度重视。

湍流是一种高度复杂的非稳态、带旋转的三维流动。在湍流中，流体的各种物理参数，如加速度、压力、温度等都随着时间与空间发生随机的变化。从物理结构上说，可以把湍流看成是由各种不同尺度的涡旋叠合而成的流动，这些涡流的尺度大小和旋转轴的方向分布都是随机的。大尺度的涡旋主要由流动的边界条件决定，其尺寸可以与流场的大小相比拟，是引起低频脉动的

原因：小尺度的涡旋主要由粘性力决定，其尺寸可能只有流场尺寸的千分之一的量级，是引起高频脉动的原因。大尺度的涡破裂后形成小尺度的涡。大尺度涡流不断从主流获得能量，通过涡间的相互作用，能量逐渐向小尺度涡传递。最后由于流体粘性的作用，小尺度的涡不断消失，机械能就转化（或称耗散）为流体的热能。同时由于边界的作用、扰动及速度梯度的作用，新的涡旋又不断产生，这就构成了湍流运动。流体内不同尺度的涡的随机运动造成了湍流的一个重要特点——物理量的脉动。

关于湍流运动的数值计算，是目前计算流体力学中困难最多因而研究最活跃的领域之一。已经采用的数值计算方法可以大致分为以下三类。^[61]

3.2.1 直接数值模拟（DNS）

直接数值模拟（Direct Numerical Simulation，简称 DNS）方法就是直接用瞬时的 Navier-Stokes 方程对湍流进行计算。DNS 的最大好处是无需对湍流流动作任何简化或近似，理论上可以得到相对准确的计算结果^[62,64]。

但是，实验测试表明^[66]，在一个 $0.1 \times 0.1 \text{m}^2$ 大小的流动区域内，在高 Reynolds 数的湍流中包含尺度为 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 的涡，要描述所有尺度的涡，则计算的网格节点数将高达 $10^9 \sim 10^{12}$ 。同时，湍流脉动的频率约为 10kHz ，因此，必须将时间的离散步长取为 $100\mu\text{s}$ 以下。在如此微小的空间和时间步长下，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。对于这样的计算要求，现有的计算机能力还是比较困难的。DNS 对内存空间及计算速度的要求非常高，目前仅有少数能使用超级计算机的研究者才能从事这一类的研究和计算。

3.2.2 大涡模拟（LES）

为了模拟湍流流动，一方面要求计算区域的尺寸应大到足以包含湍流运动中出现的最大涡，另一方面要求计算网格的尺度应小到足以分辨最小涡的运动。然而，就目前的计算机能力来讲，能够采用的计算网格的最小尺度仍比最小涡的尺度大许多。因此，目前只能放弃对全尺度范围上涡的运动的模拟，而只将比网格尺度大的湍流运动通过 Navier-Stokes 方程直接计算出来，对于小尺度的涡对大尺度运动的影响则通过建立近似的模型来模拟，从而形

成了目前的大涡模拟法 (large eddy simulation, 简称 LES)^[66]。

总体而言, LES 方法对计算机内存及 CPU 速度的要求仍比较高, 但低于 DNS 方法。目前, 在工作站和高档 PC 机上已经可以开展 LES 工作, FLUENT 等商用软件也提供了 LES 模块供用户选择。LES 方法是目前 CFD 研究和应用的热点之一^[67-68]。

3.2.3 Reynolds 平均法 (RANS)

多数观点认为, 虽然瞬时的 Navier-Stokes 方程可以用于描述湍流, 但 Navier-Stokes 方程的非线性使得用解析的方法精确描写三维时间相关的全部细节极端困难, 即使能真正得到这些细节, 对于解决实际问题也没有太大的意义。这是因为, 从工程应用的观点上看, 重要的是湍流所引起的平均流场的变化, 是整体的效果。所以, 人们很自然地想到求解时均化的 Navier-Stokes 方程, 而将瞬态的脉动量通过某种模型在时均化的方程中体现出来, 由此产生了 Reynolds 平均法。Reynolds 平均法的核心是不直接求解瞬时的 Navier-Stokes 方程, 而是想办法求解时均化的 Reynolds 方程。这样, 不仅可以避免 DNS 方法的计算量大的问题, 而且对工程实际应用可以取得很好的效果。Reynolds 平均法是目前使用最为广泛的湍流数值模拟方法^[69]。

3.2.4 湍流基本模型

流体试验表明, 当 Reynolds 数小于某一临界值时, 流动是平滑的, 相邻的流体层彼此有序地流动, 这种流动称作层流 (laminar flow)。当 Reynolds 数大于临界值时, 会出现一系列复杂的变化, 最终导致流动特征的本质变化, 流动呈无序的混乱状态。这时, 即使是边界条件保持不变, 流动也是不稳定的, 速度等流动特性都随机变化, 这种状态称为湍流 (turbulent flow)^[66]。

一般认为, 无论湍流运动多么复杂, 非稳态的连续方程和 Navier-Stokes 方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。在此, 考虑不可压流动, 使用笛卡儿坐标系, 速度矢量 u 在 x 、 y 和 z 方向的分量为 u 、 v 和 w , 写出湍流瞬时控制方程如下:

$$\operatorname{div} U = 0 \quad (2.4.1a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{gradu}) \quad (2.4.1b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}v) \quad (2.4.1c)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}w) \quad (2.4.1d)$$

对于所有尺度的湍流模型，雷诺平均 N-S 方程只是传输平均的数量。在雷诺平均中，在瞬态 N-S 方程中要求的变量已经分解为时均常量和变量。以速度为例：

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i$$

这里 $\bar{u}_i$ 和 u'_i 是时均速度和脉动分量。

用这种形式的表达式把流动的变量放入连续性方程和动量方程并且取一段时间的平均，这样可以写成以下的形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.4.2a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (2.4.2b)$$

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \phi)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_j \phi'} \right] + S \quad (2.4.2c)$$

上面三式就是用张量的指标形式表示的时均连续方程、Reynolds 方程和标量 ϕ 的时均输运方程。这里的 i 和 j 指标取值范围是(1, 2, 3)。根据张量的有关规定，当某个表达式中一个指标重复出现两次，则表示要把该项在指标的取值范围内遍历求和。对照式(2.4.2)可以看到，时均流动的方程里多出与 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 有关的项，我们定义该项为 Reynolds 应力（湍流应力）：

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$$

这里 τ_{ij} 实际对应 6 个不同的 Reynolds 应力项，即 3 个正应力和 3 个切应力。由式(2.4.2)构成的方程组共有 5 个方程(Reynolds 方程实际是 3 个)，现

在新增了 6 个 Reynolds 应力, 再加上原来的 5 个时均未知量(u_x 、 u_y 、 u_z 、 P 和 ϕ), 总共有 10 个未知量, 因此, 方程组不封闭, 必须引入新的湍流模型(方程)才能使方程组(2.4.2)封闭。

湍动粘度的提出来源于 Boussinesq 提出的涡粘假定, 该假定建立了 Reynolds 应力相对于平均速度梯度的关系, 即:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \left[\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] \delta_{ij}$$

这里, μ_t 为湍动粘度, u_i 为时均速度, δ_{ij} 是 “Kronecker delta” 符号(当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$), k 为湍动能:

$$k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$$

湍动粘度 μ_t 是空间坐标的函数, 取决于流动状态, 而不是物性参数, 这里的下标 t 表示湍流流动的意思。由上可见, 引入 Boussinesq 假定以后, 计算湍流流动的关键就在于如何确定 μ_t 。这里所谓的涡粘模型, 就是把 μ_t 与湍流时均参数联系起来的表达式。依据确定 μ_t 的微分方程数目的多少, 涡粘模型包括:

1、零方程模型

所谓零方程模型是指不使用微分方程, 而是用代数关系式, 把湍动粘度与时均值联系起来的模型。它只用湍流的时均连续方程和 Reynolds 方程组成方程组, 把方程组中的 Reynolds 应力用平均速度场的局部速度梯度来表示。

零方程模型方案有多种, 最著名的是 Prandtl 提出的混合长度模型(mixing length model)。Prandtl 假定湍动粘度 μ_t 正比于时均速度 u_i 的梯度和混合长度 l_m 的乘积^[55], 在二维问题中, 有:

$$\mu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$$

湍流切应力表示为:

$$-\overline{\rho u'v'} = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y}$$

其中, 混合长度 l_m 由经验公式或实验确定, 详细信息可从文献[55]中获得。

2、一方程模型

在零方程模型中,湍动粘度 μ_t 和混合长度 l_m 都把 Reynolds 应力和当地平均速度梯度相联系,是一种局部平衡的概念,忽略了对流和扩散的影响。为了弥补混合长度假定的局限性,人们建议在湍流的时均连续方程和 Reynolds 方程的基础上,再建立一个湍动能 k 的输运方程,而 μ_t 表示成 k 的函数,从而可使方程组封闭。这里,湍动能 k 的输运方程可写为^[60]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho C_D \frac{k^{3/2}}{l}$$

从左至右,方程中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项、产生项、耗散项。由 Kolmogorov-Prandtl 表达式^[61],有:

$$\mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} l$$

其中 σ_k , C_D , C_μ 为经验常数, l 为湍流脉动的长度比尺,依据经验公式或实验而定^[62]。

3、两方程模型

最简单的完整湍流模型是两个方程的模型,要解两个变量,速度和长度尺度。在 FLUENT 中,标准 $k-\varepsilon$ 模型自从被 Launder and Spalding 提出之后,就变成工程流场计算中主要的工具了。适用范围广、经济、合理的精度,这就是为什么它在工业流场和热交换模拟中有如此广泛的应用了。它是个半经验的公式,是从实验现象中总结出来的,主要是基于湍流动能和扩散率。其中 k 方程是个精确方程, ε 方程是个由经验公式导出的方程。

由于人们已经知道了 $k-\varepsilon$ 模型适用的范围,因此人们对它加以改造,出现了 RNG $k-\varepsilon$ 模型和带旋流修正 $k-\varepsilon$ 模型。

3.3 常用的离散化方法简介

由于所引入的因变量在节点之间的分布假设及推导离散化方程的方法不同,就形成了有限差分法、有限元法、有限元体积法等不同类型的离散化方法。^[63]

3.3.1 有限差分法

有限差分法 (Finite Difference Method, 简称 FDM) 是数值解法中最经典的方法。它是将求解域划分为差分网格, 用有限个网格节点代替连续的求解域, 然后将偏微分方程 (控制方程) 的导数用差商代替, 推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求差分方程组 (代数方程组) 的解, 就是微分方程定解问题的数值近似解, 这是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。

这种方法发展较早, 比较成熟, 较多的用于求解双曲型和抛物型问题。用它求解边界条件复杂、尤其是椭圆型问题不如有限元法或有限体积法方便。

3.3.2 有限元法

有限元法 (Finite Element Method, 简称 FEM) 与有限差分法都是广泛应用的流体动力学数值计算方法。有限元法是将一个连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元, 并于各小单元分片构造插值函数, 然后根据极值原理 (变分或加权余量法), 将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程, 把总体的极值作为各单元极值之和, 即将局部单元总体合成, 形成嵌入了指定边界条件的代数方程组, 求解该方程组就得到各节点上待求的函数值。

有限元法具有很广泛的适应性, 特别适用于几何及物理条件比较复杂的问题, 而且便于程序的标准化。对椭圆型方程问题有更好的适用性。但因其求解速度较有限差分法和有限体积法慢, 因此, 在商用 CFD 软件中应用并不普遍。而有限元法目前在固体力学分析中占绝对比例, 几乎所有固体力学分析软件全部采用有限元法。

3.3.3 有限体积法

有限体积法 (Finite Volume Method, 简称 FVM), 是近年发展非常迅速的一种离散化方法, 其特点是计算效率高。目前在 CFD 领域得到了广泛应用, 大多数商用 CFD 软件都采用这种方法。

有限体积法又称为控制体积法 (Control Volume Method, CVM)。其基本思

路是：将计算区域划分为网格，并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积；将待解微分方程（控制方程）对每一个控制体积积分，从而得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上的因变量 ϕ 。为了求出控制体积的积分，必须假定 ϕ 值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法看来，有限体积法属于加权余量法中的子域法，从未知解的近似方法看来，有限体积法属于采用局部近似的离散方法。简言之，子域法加离散，就是有限体积法的基本方法。

3.4 CFD 计算流程

CFD 的求解过程通常如下图所示。

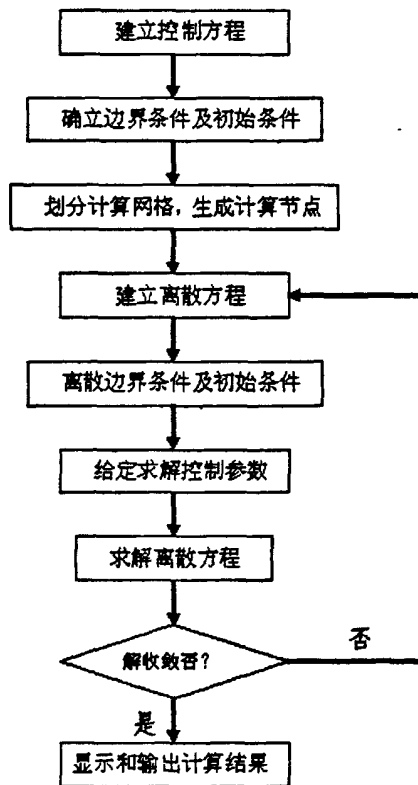


图 3-1 CFD 工作流程图

3.4.1 建立控制方程

建立控制方程，是求解问题前必须首先进行的。对于一般的流体流动而言，可根据质量守恒方程和动量守恒方程分析直接写出其控制方程。对于流动大多是处于湍流范围的问题，一般情况下，需要增加湍流方程。

3.4.2 确定边界条件与初始条件

边界条件与初始条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的边界条件、初始条件的组合构成对一个物理过程完整的数学描述。

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。对于任何问题，都需要给定边界条件。

初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。对于瞬态问题，必须给定初始条件。对于稳态问题，不需要初始条件。

3.4.3 划分计算网格

采用数值方法求解控制方程时，都是想办法将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到的离散方程组。要想在空间域上离散控制方程，必须使用网格。

不同的问题采用不同数值解法时，所需要的网格形式是有一定区别的，但生成网格的方法基本是一致的。目前，网格分结构网格和非结构网格两大类。简单的讲，结构网格在空间上比较规范，如对一个四边形区域，网格往往是成行成列分布的，行线和列线比较明显。而对非结构网格在空间分布上没有明显的行线和列线。

3.4.4 建立离散方程

对于在求解域内所建立的偏微分方程，理论上是有真解（或称精确解或解析解）的。但由于所处理的问题自身的复杂性，一般很难获得方程的真解。因此，就需要通过数值方法把计算域内有限数量位置（网格节点或网格中心

点)上的因变量值当作基本未知量来处理,从而建立一组关于这些未知量的代数方程组,然后通过求解代数方程组来得到这些节点值,而计算域内其他位置上的值则根据节点位置上的值来确定。

3.4.5 离散边界条件和初始条件

前面所给定的边界条件和初始条件是连续性的,现在需要针对所生成的网格,将连续性的边界条件和初始条件转化为特定节点上的值,这样,连同在各节点处所建立的离散的控制方程,才能对方程组进行求解。

3.4.6 给定求解控制参数

在离散空间上建立了离散化的代数方程组,并施加离散化的边界条件和初始条件后,还需要给定流体的物理参数和湍流模型的经验系数等。此外,还要给定迭代计算的控制精度、瞬态问题的时间步长和输出频率等。

3.4.7 求解离散方程

在进行了上述设置后,生成了具有定解条件的代数方程组。对于这些方程组,数学上已有相应的解法,如线形方程组可采用 Gauss 消去法或 Gauss-Seidel 迭代法求解,而对非线性方程组,可采用 Newton-Raphson 方法。

3.4.8 判断解的收敛性

对于稳态问题的解,或是瞬态问题在某个特定时间步长上的解,往往要通过多次迭代才能得到。有时,因网格形式或网格大小、对流项的离散插值格式等原因,可能导致解的发散。因此,在迭代过程中,要对解的收敛性随时进行监视,并在系统达到指定精度后,结束迭代过程。

3.4.9 显示和输出计算结果

通过上述求解过程得出了各计算节点上的解后,需要通过适当的手段将整个计算域上的结果表示出来。这时,我们可采用线值图、矢量图、等值线图、流程图、云图等方式对计算结果进行表示。

所谓线值图,是指在二维或三维空间上,将横坐标取为空间长度或时间历程,将纵坐标取为某一物理量,然后用光滑曲线或曲面在坐标系内绘制出某一物理量沿空间或时间的变化情况。矢量图是直接给出二维或三维空间里矢量的方向及大小,一般用不同颜色和长度的箭头表示速度矢量。等值线图是用不同颜色的线条表示相等物理量的一条线。流程图是用不同颜色线条表示质点运动轨迹。云图是使用渲染的方式,将流场某个截面上的物理量用连续变化的颜色块表示其分布。

3.5 FLUENT 介绍

FLUENT 是由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的 CFD 软件。FLUENT 是目前功能最全面、适用性最广、国内使用最广泛的 CFD 软件之一。

FLUENT 提供了非常灵活的网格特性,让用户可以使用非结构网格,包括三角形、四边形、四面体、六面体、金字塔形网格来解决具有复杂外形的流动。它允许用户根据解的具体情况对网格进行修改(细化/粗化)。FLUENT 使用 GAMBIT 作为前处理软件,它可读入多种 CAD 软件的三维几何模型和多种 CAE 软件的网格模型。FLUENT 可用于二维片面、二维轴对称和三维流动分析,可完成多种参考系下流场模拟、定常与非定常流动分析、不可压流和可压流计算、层流和湍流模拟、传热和热昏后分析、化学组分混合核反应分析、多相流分析、固体与流体耦合传热分析、多孔介质分析等。

FLUENT 使用 C 语言开发完成,支持 UNIX 和 Windows 等多种平台,可实现动态内存分配及高效数据结构,具有很大的灵活性与很强的处理能力。FLUENT 提供的用户自定义子程序功能,可让用户自行设定连续方程、动量方程、能量方程或组分输运方程中的体积源项,自定义边界条件、初始条件、流体的物性、添加新的标量方程和多孔介质模型等。

3.5.1 程序的结构

FLUENT 程序软件包由以下几个部分组成：

- (1) GAMBIT——用于建立几何结构和网格的生成。
- (2) FLUENT——用于进行流动模拟计算的求解器。
- (3) prePDF——用于模拟 PDF 燃烧过程。
- (4) TGrid——用于从现有的边界网格生成体网格。
- (5) Filters (Translators)——转换其他程序生成的网格，用于 FLUENT 计算。

利用 FLUENT 软件进行流体流动与传热的模拟计算流程如图 3-2 所示^[6]。首先利用 GAMBIT 进行流动区域几何形状的构建、边界类型以及网格的生成，并输出用于 FLUENT 求解器计算的格式；然后利用 FLUENT 求解器对流动区域进行求解计算，并进行计算结果的后处理。

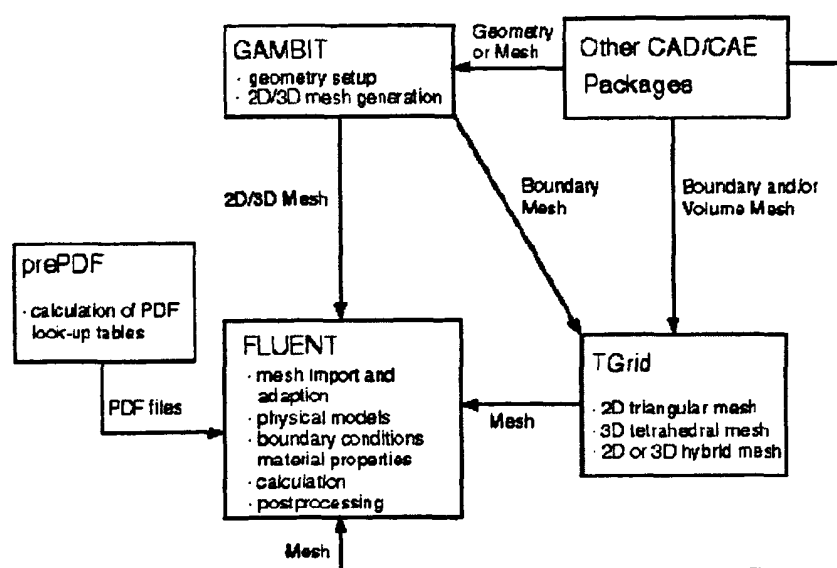


图 3-2 基本程序结构示意图

3.5.2 FLUENT 适用对象

FLUENT 广泛用于航空、汽车、透平机械、水利、电子、发电、建筑设计、材料加工、加工设备、环境保护等领域，其主要的模拟能力包括：

-
- 用非结构自适应网格求解 2D 或 3D 区域内的流动;
 - 不可压或可压流动;
 - 稳态分析或瞬态分析;
 - 无粘、层流和湍流;
 - 牛顿流体或非牛顿流体;
 - 热、质量、动量、湍流和化学组分的体积源项模型;
 - 各种形式的热交换, 如自然对流、强迫对流、混合对流、辐射热传导等;
 - 惯性坐标系及非惯性坐标系模型;
 - 多重运动参考系, 包括滑动网格界面、转子与定子相互作用的动静结合模型;
 - 化学组分的混合与反应模型, 包括燃烧子模型和表面沉积反应模型;
 - 粒子、水滴、气泡等离散相的运动轨迹计算, 与连续相的耦合计算;
 - 相变模型;
 - 多相流;
 - 空化流;
 - 多孔介质中的流动;
 - 用于风扇、泵及热交换器的集总参数模型;
- 复杂外形的自由表面流动。
-

第 4 章 街道峡谷 CFD 数值模拟

4.1 模型建立与网格生成

模型在 gambit 中建立, 建立了两个十字路口的计算模型, 为方便叙述, 将模型中各路口分别用 A、B、C、D、E、F 标明, 如图 4-1 所示. 模型考虑一条主干道 (AB 长 1260m, 宽 40m) 与两条次干道 (CD、EF 长 440m, 宽 30m) 垂直相交的街道以及邻街的第一排建筑物. 不考虑化学变化, 模拟街区 2m 高处风速场和污染物 CO 浓度场 (对行人影响的高度一般 1.5m-2m). 模拟中, 将街道考虑为面源, 源强为 $0.61 \text{ mg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 该值是魏雄辉等利用 1997 年北京市的交通状况资料进行估算, 得到的一个有实际意义的值^[40]. 假设外界温度为均一的 300 K, 街区高宽比 H/L 为 1、1.5、2, 风向与主干道 AB 方向成 0° 、 45° 夹角。

由于街区处于大气近地面层, 进风口边界条件采用环境影响评价技术导则大气环境部分所建议的幂指数风廓线^[41], 设边界风速为 $u=u_{10} \left[\frac{z}{10} \right]^{0.14}$, 其中 u_{10} 为 10 m 高度上的风速, 设为 2m/s、4.5m/s (此风速为北京街区的风速)^[42], z 为计算风速的高度. 模型解域为 $840 \text{ m} \times 1660 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的立方体“抠除”地面建筑物后的空间. 考虑几种具体方案见表 4-1。

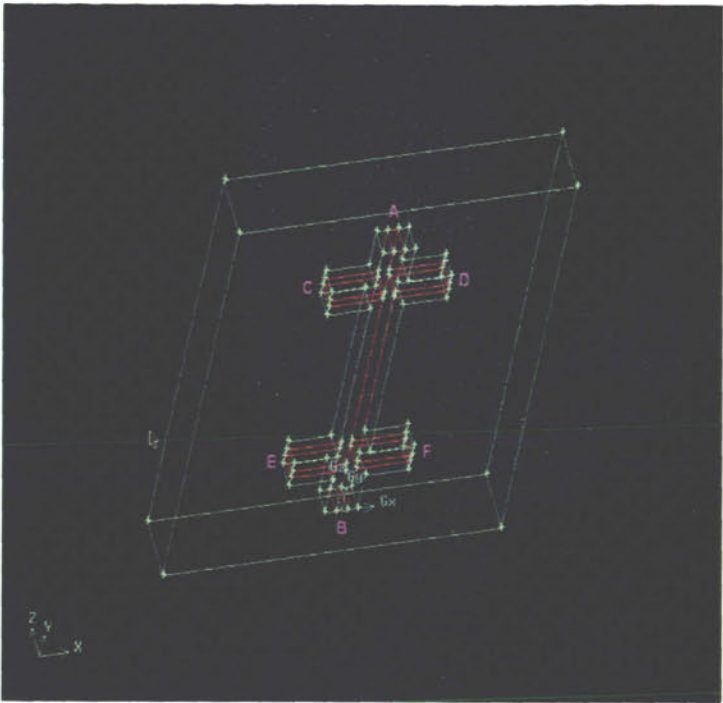


图 4-1 模型结构示意图

把街区平面图划分为 11 个观察点，如图 4-2:

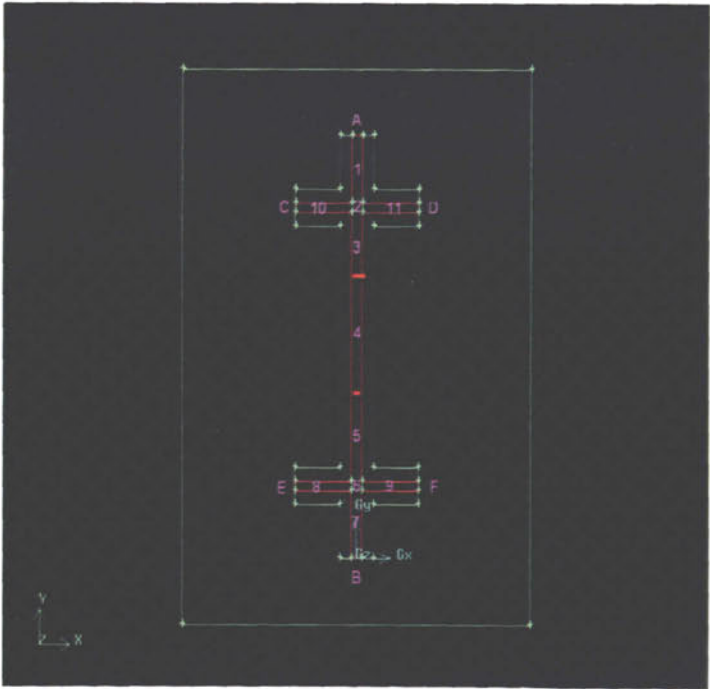


图 4-2 模型平面示意图

本文所建模型, 由于下垫面极为复杂, 难以用 Gambit 划分结构化网格, 故对整个解域作非结构化网格划分, 所有网格均为四面体网格. 进行模拟时, 首先用 Gambit 建立计算模型和网格划分, 然后将划分好的网格数据读入 Fluent 进行数值计算. 模型网格化如图 4-3 所示。

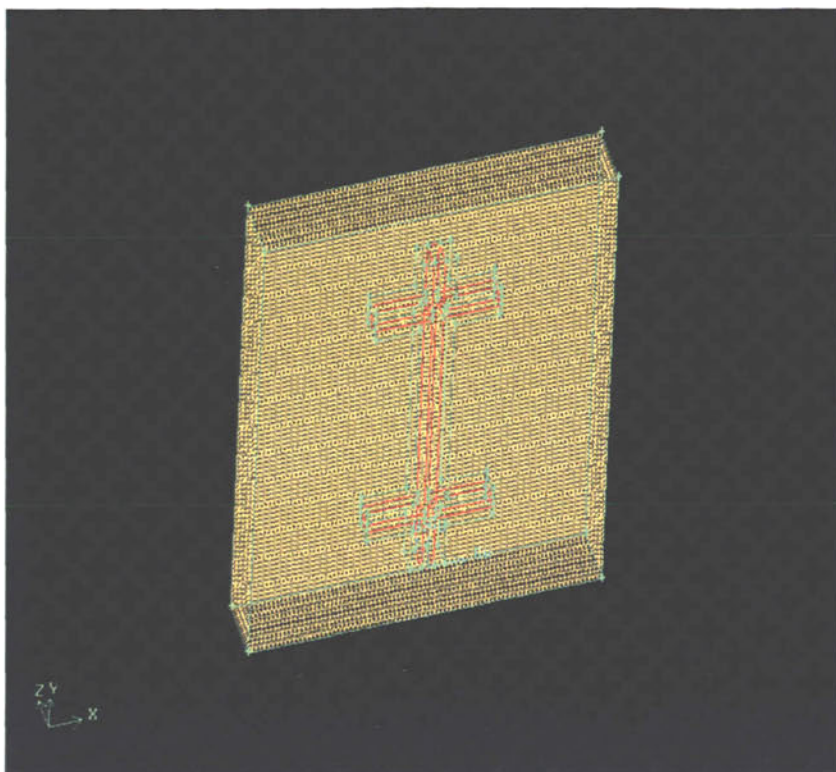


图 4-3 模型网格示意

4.2 湍流模型选取及边界条件设置

4.2.1 湍流模型选取

对于湍流,Fluent 提供了多种闭合方案供选择,其中就包括标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、realizable $k-\varepsilon$ 模型等。

(1) 标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型

该模型是目前使用最为广泛的湍流模型。标准 $k-\varepsilon$ 模型是典型的两方程

模型, 其在关于湍动能 k 的输送方程的基础上, 引入一个关于湍动耗散率 ε 的方程, 形成了 $k-\varepsilon$ 两方程模型, 称为标准 $k-\varepsilon$ 模型 (standard $k-\varepsilon$ model)。该模型是由 Launder 和 Spalding 于 1972 年提出的^[10]。

在该模型中, 表示湍动能 (turbulent kinetic energy) 的 k 为:

$$k = \frac{\overline{u'_i u'_i}}{2} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

表示湍动耗散率 (turbulent dissipation rate) 的 ε 被定义为:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right)$$

湍流粘度 μ_t 可表示成 k 和 ε 的函数, 即:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

其中, C_μ 为经验常数, 稍后给出。

在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, k 和 ε 是两个基本未知量, 与之相对应的输送方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

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

其中, G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, G_b 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项, Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ε 分别是与湍动能 k 和湍动耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项。

(2) RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型

将标准 $k-\varepsilon$ 模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流动时, 会出现一定失真, 为此, 本节介绍标准 $k-\varepsilon$ 模型的改进方案: RNG $k-\varepsilon$ 模型。RNG $k-\varepsilon$ 模型是由 Yakhot 及 Orzag 提出的^[11], 该模型中的 RNG 是英文 “renormalization group” 的缩写, 有些中文文献将其译为重正化群, 本文直接使用 RNG 原名。在 RNG $k-\varepsilon$ 模型中, 通过在大尺度运动和修正后的粘度项体现小尺度的影

响，而使这些小尺度运动有系统地从控制方程中去除。所得到的 k 方程和 ε 方程，与标准 $k-\varepsilon$ 模型非常相似：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

其中，

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.0845, \alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68$$

$$\eta = (2E_{ij} \bullet E_{ji})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$$

$$E_{ij} = 1/2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\eta_0 = 4.377, \beta = 0.012$$

与标准 $k-\varepsilon$ 模型比较发现，RNG $k-\varepsilon$ 模型主要变化是：

A、通过修正湍动粘度，考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况；

B、在 ε 方程中增加了一项，从而反映了主流的时均应变率 E_{ij} ，这样，RNG $k-\varepsilon$ 模型中产生项不仅与流动情况有关，而且在同一问题中也还是空间坐标的函数。

从而，RNG $k-\varepsilon$ 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。Chang 等的研究认为，标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 湍流闭合模型都可以较好地模拟模型街道峡谷内的流场和污染状况^[31]，而 RNG $k-\varepsilon$ 方案是在标准 $k-\varepsilon$ 方案

上发展起来的,弥补了标准 $k-\varepsilon$ 闭合方案的一些不足^[4],因此本文选取 RNG $k-\varepsilon$ 湍流闭合模型用于下文数值模拟。

4.2.2 边界条件设置

模型上风向选用速度进口 (velocity inlet) 边界条件,下风向选用出口 (outlet-vent) 边界条件,两旁建筑物选用壁面 (wall) 边界条件,街道入口选用入口 (inlet-vent) 边界条件,街道上空选用压力入口 (pressure-inlet) 边界条件,模型外边界上空选用压力远场 (pressure-far-field) 自由边界条件,co 污染物入口选用入口 (inlet-vent) 边界条件。

边界上需要制定湍动能 k 和湍动耗散率 ε 。

$$k = \frac{3}{2}(\bar{u}I)^2$$

$$\text{其中 } I = u' / \bar{u} = 0.16(\text{Re}_{D_H})^{1/8}$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$$

$$\text{其中 } C_\mu = 0.09, l = 0.07L$$

以上各式中, $\bar{u}$ 为平均速度; I 为湍流强度 (turbulence intensity);

Re_{D_H} 为按水力直径 D_H 计算得到的 Reynolds 数; l 为湍流长度尺度 (turbulence length scale); L 为关联尺寸,对于充分发展的湍流,可取 L 等于水力直径。

4.2.3 多相流模型的选取

多相流就是在流体流动中不是单相物质,而是有两种或两种以上不同相的物质同时存在的一种流体运动。在 Fluent 中,采用研究多相流为欧拉-欧拉方法,共有 VOF 模型、混合物 (Mixture) 模型和欧拉 (Eulerian) 模型。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,故引入相体积率 (Phase 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，其对于所有的相都有类似的形式。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。

本次论文选用混合物 (Mixture) 模型。主要考虑到^[65]：

(1) 分散相 (空气和 CO) 有着宽广的分布，Mixture 模型是最可取的。

(2) 如果相之间的拽力规律不明了，Mixture 模型是最好的选择。

(3) Mixture 模型比 Eulerian 模型要少求解一部分方程，所以 Mixture 模型计算量较少。如果精度要求很高，Eulerian 模型是最好的选择。但是，复杂的 Eulerian 模型比 Mixture 模型的计算稳定性要差。

4.3 街区模型风速场的数值模拟与分析

街区风场的主要影响对象是路边的行人，风场的强弱可能给户外行人带来不舒服感，而行人高度风主要是离地面 2 米处的风，因此本文主要模拟的是离地面 2 米处的风速场。

4.3.1 街区模型风速场的模拟方案

表 4-1 风速场模拟方案表

街区高宽比 H/L	风向与主街道 AB 的 加角 (度)	街道 10 米处的风 速 (m/s)	街区 2 米处风速场
1 (40m/40m)	0°	2	Graph1
		4.5	Graph2
	45°	2	Graph3
		4.5	Graph4
1.5 (60m/40m)	0°	2	Graph5
		4.5	Graph6
	45°	2	Graph7
		4.5	Graph8
2 (80m/40m)	0°	2	Graph9
		4.5	Graph10
	45°	2	Graph11
		4.5	Graph12

如图 4-2 模型平面示意图,我们把 2 米处街区的风速场划分为 11 个观察区域,记录并比较各观察点的风速变化。

4.3.2 收敛性

通过优化网格,改进各种参数设置,设置更合理的初始化参数,控制松弛因子等方法,保证并提高迭代的收敛性。通过残差历史来判断计算达到收敛,如图 4-4 所示。

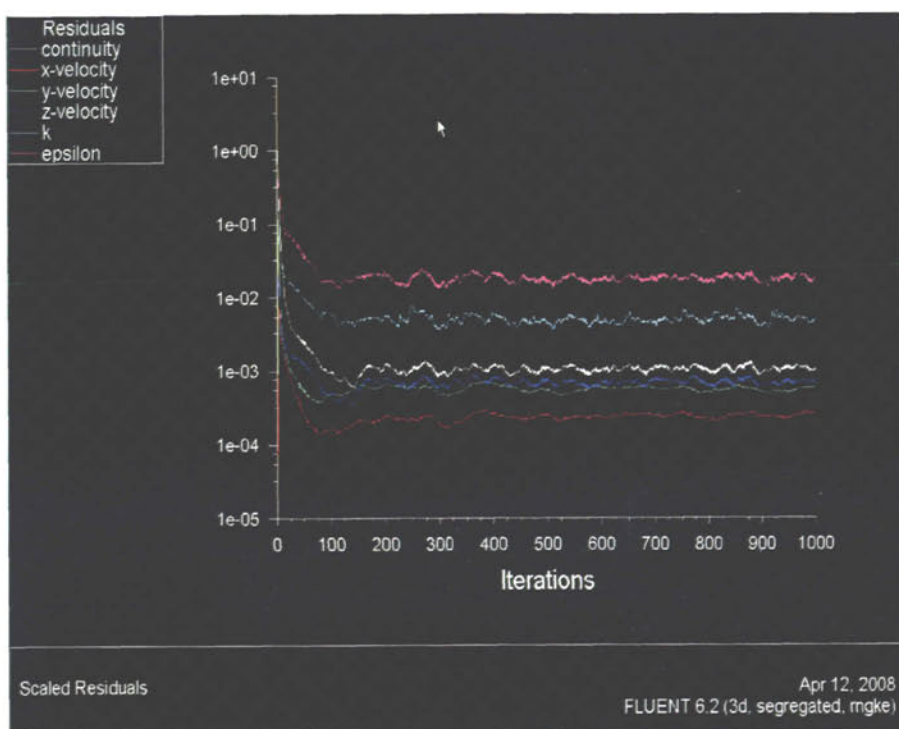


图 4-4 残差历史图

4.3.3 计算结果

按照我们设计的表 4-1 风速场模拟方案表,通过 Fluent 的模拟计算我们可以得到一组街区 2 米处的风速场图形 (Graph1-Graph12)

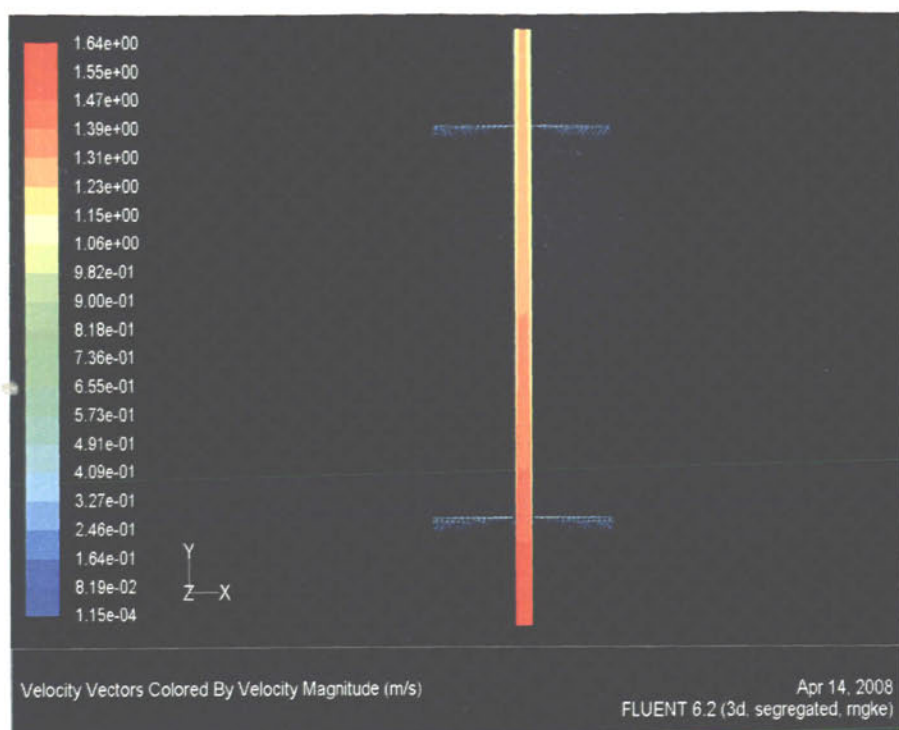


图 4-5 街区 2 米处风速场-Graph1

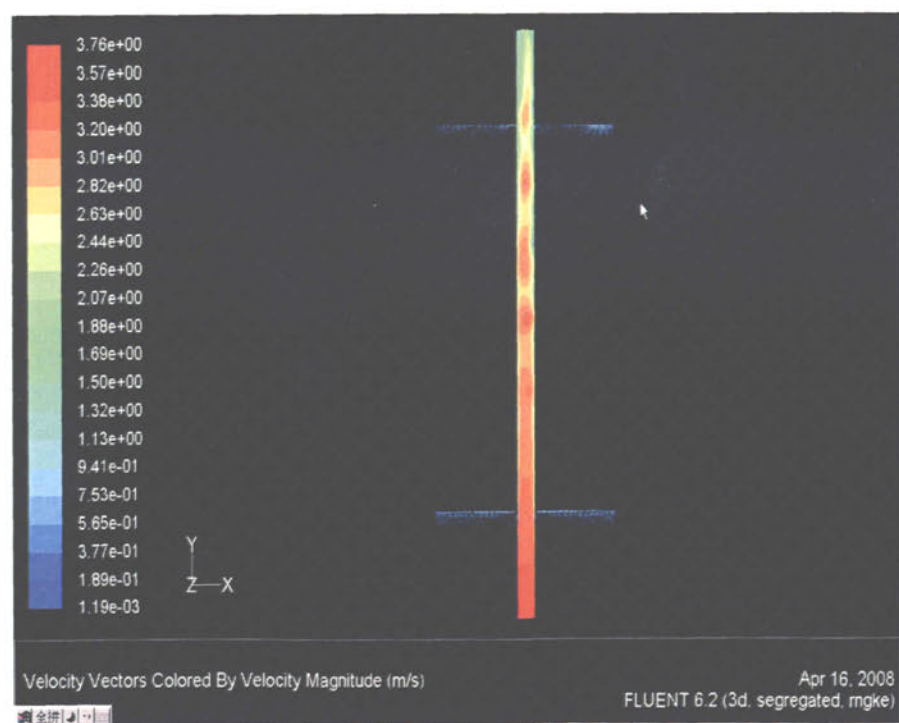


图 4-6 街区 2 米处风速场-Graph2

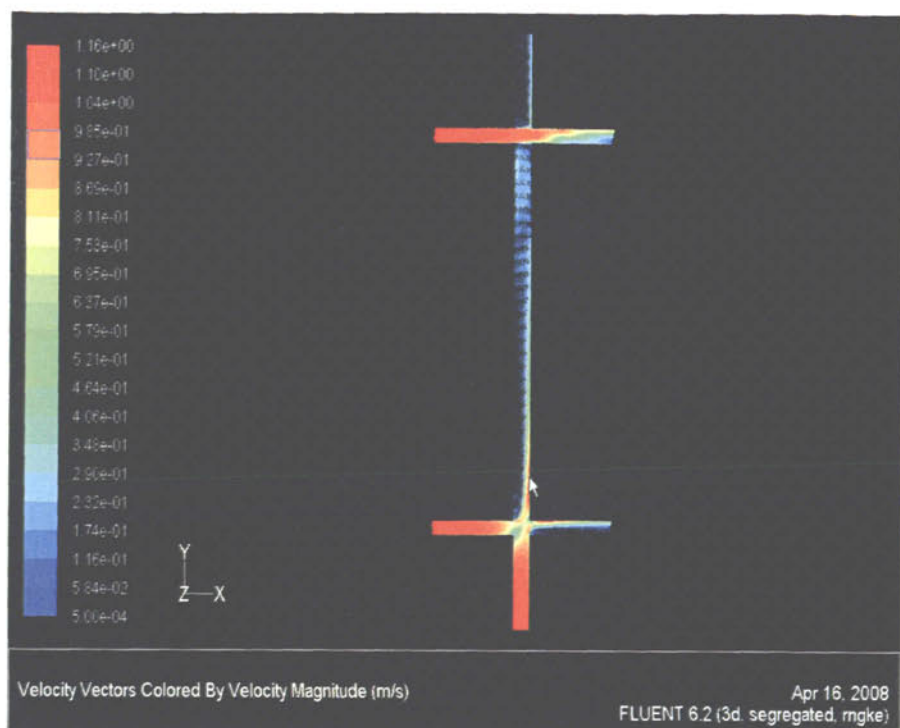


图 4-7 街区 2 米处风速场-Graph3

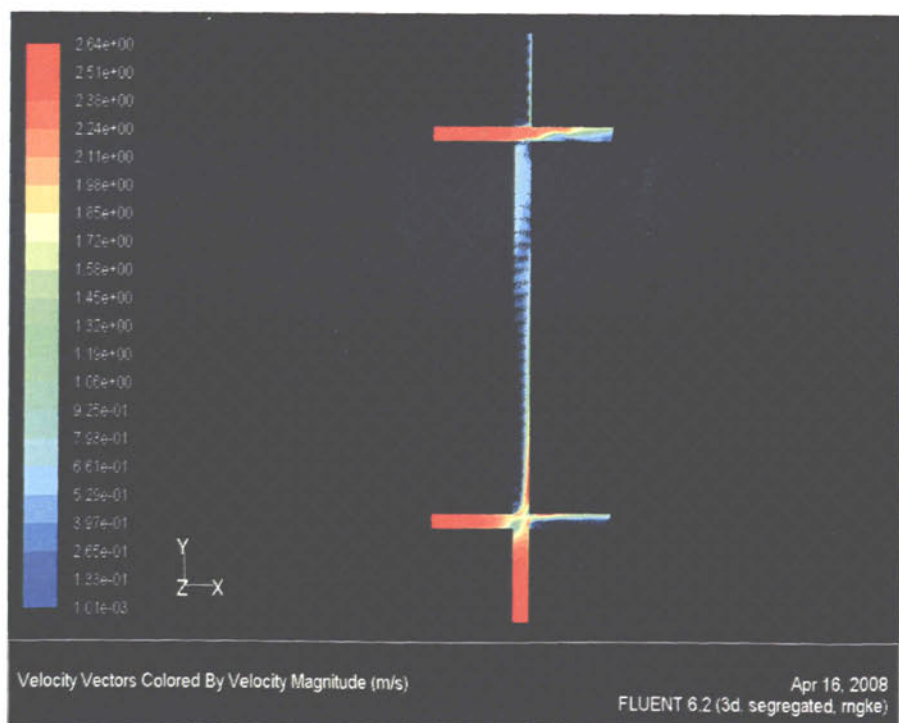


图 4-8 街区 2 米处风速场-Graph4

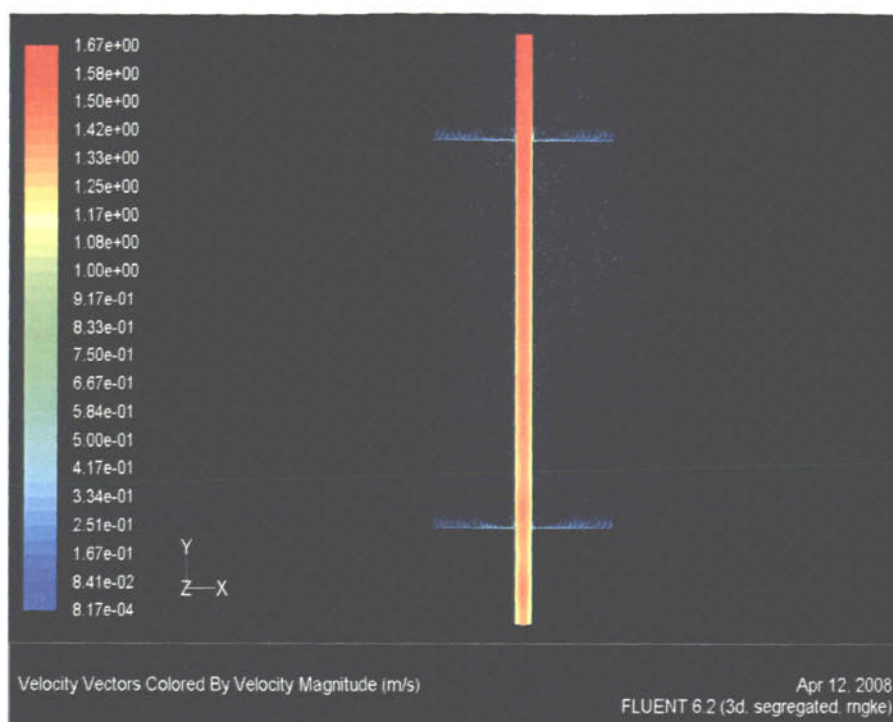


图 4-9 街区 2 米处风速场-Graph5

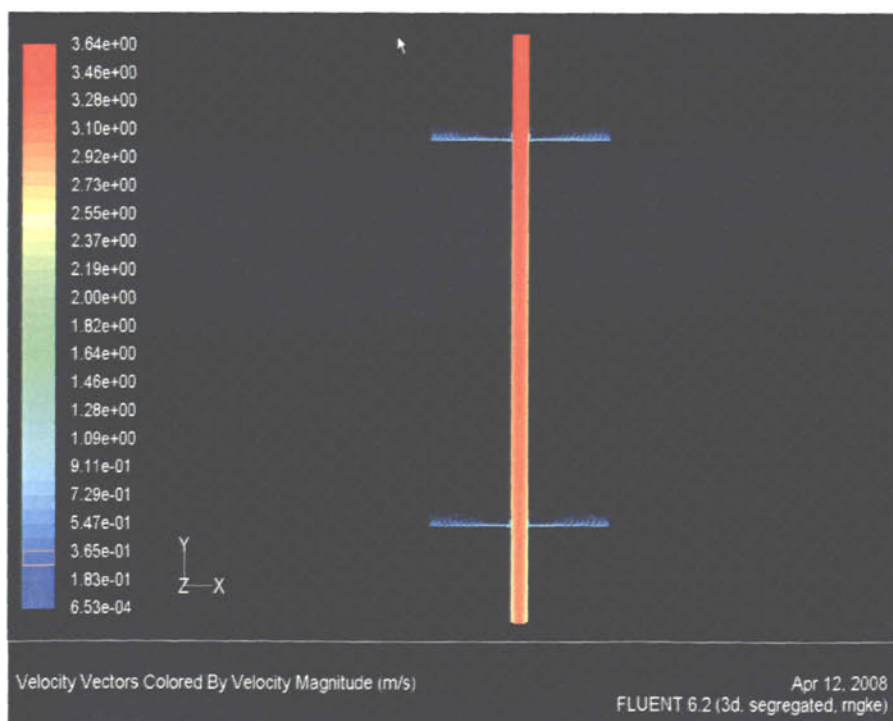


图 4-10 街区 2 米处风速场-Graph6

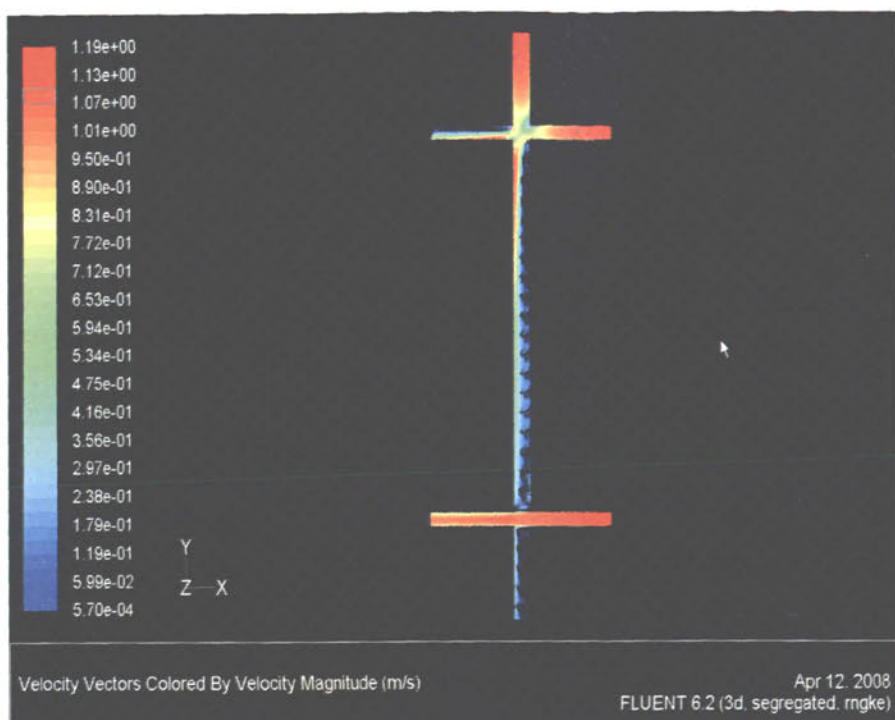


图 4-11 街区 2 米处风速场-Graph7

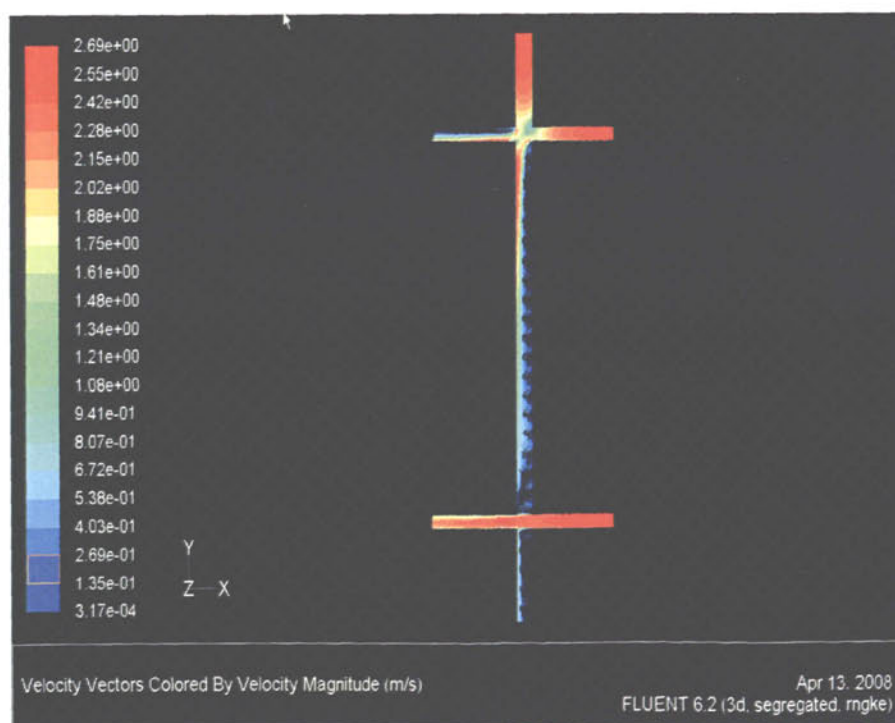


图 4-12 街区 2 米处风速场-Graph8

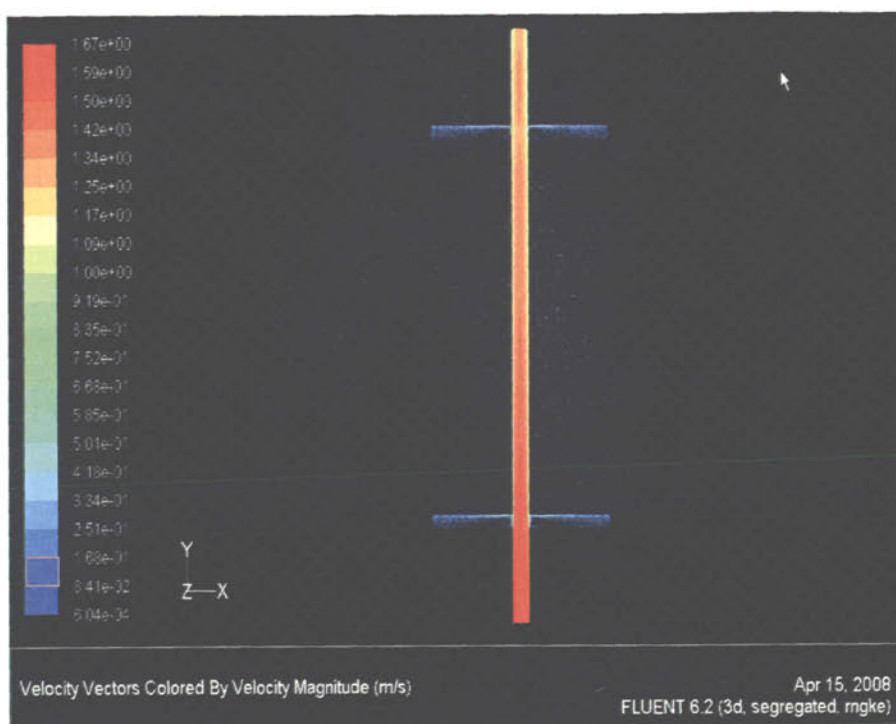


图 4-13 街区 2 米处风速场-Graph9

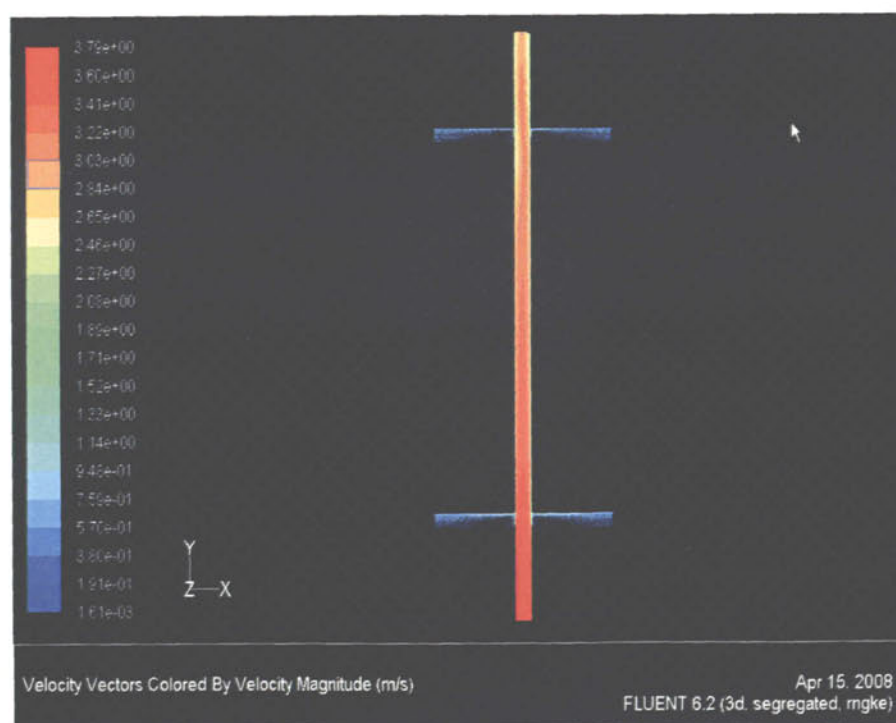


图 4-14 街区 2 米处风速场-Graph10

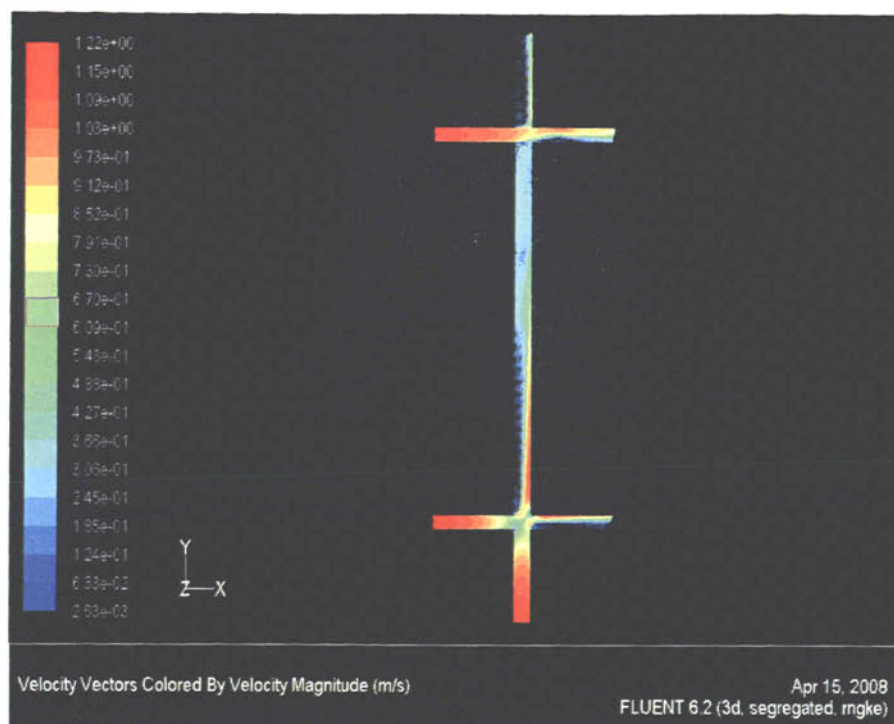


图 4-15 街区 2 米处风速场-Graph11

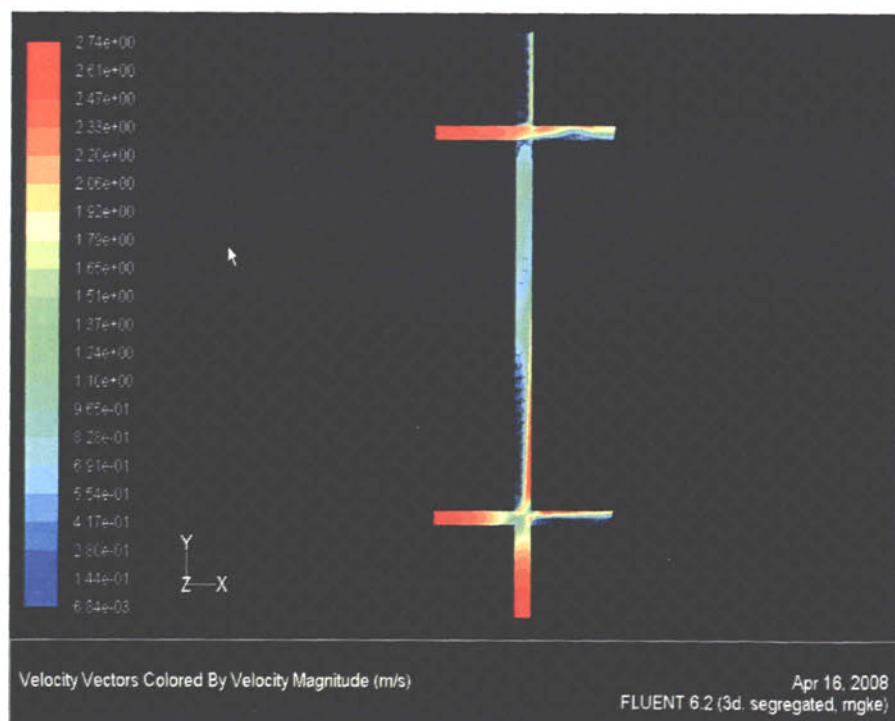
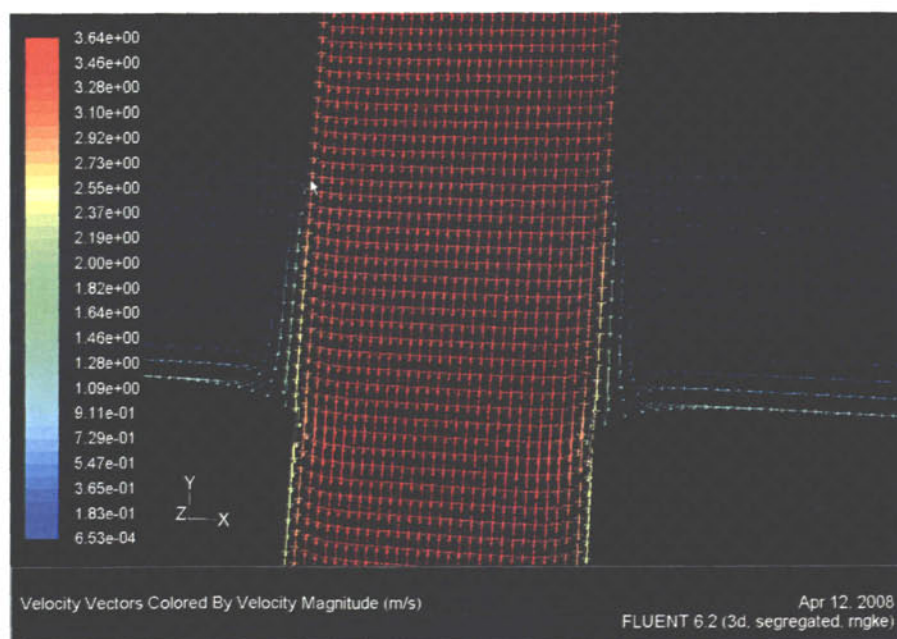
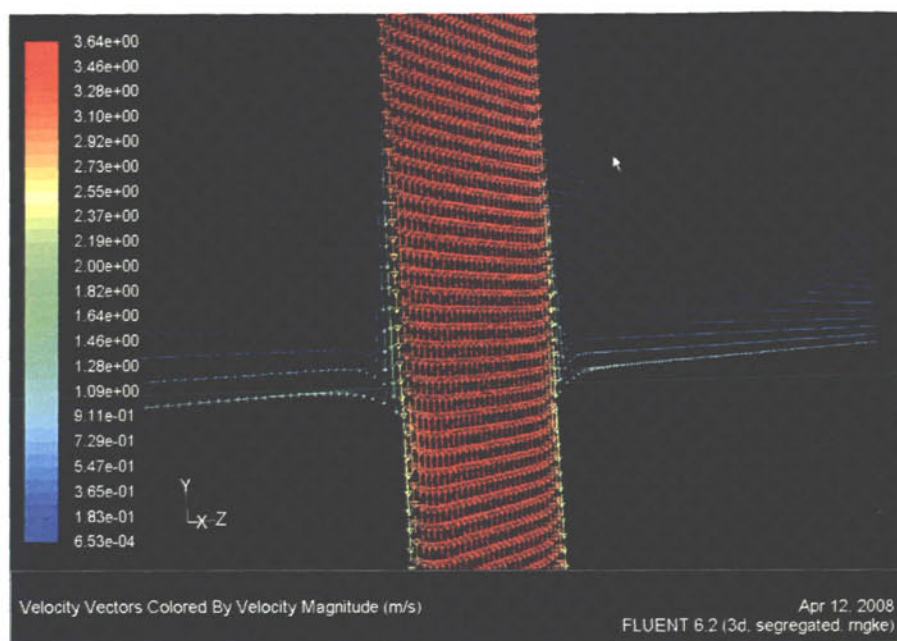


图 4-16 街区 2 米处风速场-Graph12

街区两米高处的部分风场放大后的效果图如下：



4.3.4 结果分析

表 4-2 街区 2 米处风速场各观察点数据统计表

观察点											
风速场 (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Graph1	1.55	1.47	1.39	1.39/ 1.31	1.31/ 1.06	1.31/ 1.15	1.31/ 1.23	0.409 /0.164	0.409 /0.164	0.409 /0.164	0.409 /0.164
Graph2	3.57	3.38	3.2	3.38 /3.01	3.38 /2.82	2.63	2.26	0.189	0.189	0.565	0.565
		0.69									
Graph3	1.1	5 /0.8	0.0584 /0.464	0.0584 /0.406	0.232	1.04	0.0584 /0.29	0.579 /0.927	1.1	0.0584 /0.406	1.1 /0.811
		69									
Graph4	2.51	1.72 /2.1	0.133 /1.45	0.265 /0.793	0.661 /0.793	2.38	0.133 /0.793	1.19 /2.11	2.51	0.133 /0.925	2.51 /1.98
Graph5	1.67	1.50	1.45	1.42	1.37	1.33	1.29	8.17e-4	8.17e-4	8.41e-2	8.41e-2
Graph6	3.5	3.46	3.46	3.19	3.1	3.1	2.94	1.83e-1	1.83e-1	0.273	0.273
Graph7	1.07	0.68 3	0.515	0.356	0.179	1.04	5.99e-2	1.01	1.13	0.356	1.13
Graph8	2.28	1.75	1.08	0.538	0.403	2.42	0.135	2.42	2.55	0.807	2.42
Graph9	1.59	1.59 /1.5	1.5/ 1.34	1.5/ 1.42	1.42/ 1.25	1.34	1.42/ 1.25	0.334/0.08 41	0.334/0.084 1	0.168/0.0 841	0.168/0 .0841

Graph10	3.6	3.6/ 3.41	3.41/ 3.03	3.41/ 3.22	3.03/ 2.84	3.03/ 3.22	3.22/ 2.65	0.57/ 0.191	0.57/ 0.191	0.38/ 0.191	0.38/ 0.191
Graph11	1.09	0.67	0.427/ 1.03/0	0.427/ 0.488	0.366	0.973	0.0633/ 0.548	0.973 /0.124	1.09	0.488 /0.0633	1.09
Graph12	2.47	1.65 /2.2	0.28 /1.24	0.965 /1.24	1.1	2.2 /1.92	0.144 /0.965	0.417 /0.828/ 2.2	2.47	0.144/ 1.1 /2.33	2.47 /2.33

由模拟结果图和表 4-2 的数据, 我们可以看到当街道两边建筑物高度为对称等高时, 街道高宽比 H/L 为 1、1.5、2 时其街区内风场的分布情况基本相同。这再一次证明了前人通过风洞实验得到的结论: 当街道两边建筑物高度为对称等高时 $1 < H/L < 2.1$ 街区内风速场的分布基本没有大的变化, 当风向与街区成 90° 时, 街区内只存在一个涡旋, 涡旋中心在水平方向上基本位于街道中部, 在垂直方向上位于建筑物高度中部偏上位置。涡旋形状如图 4-17, 街区内风会在背风面沿着建筑物向上爬坡。因此我们就重点分析当 $H/L=2$ 时, 高度为 2 米的街区风速场和 CO 浓度场的分布情况。

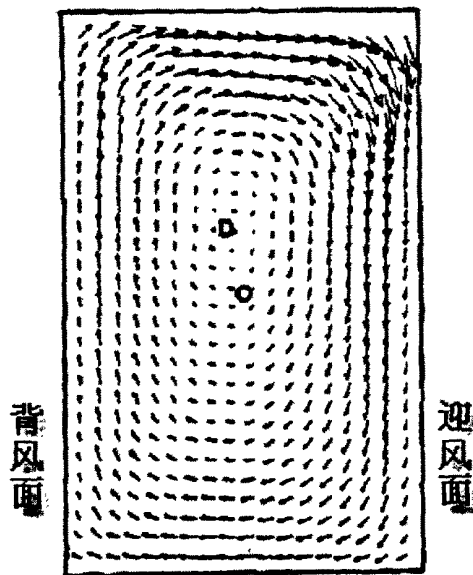


图 4-17 高宽比 $1 < H/L < 2.1$ 的涡旋图

(1) 当风向与主干道 AB 成 0° 角时

Fluent 能非常细致地刻画模拟区域内的流场, 如图 4-14-Graph10 中给出解域内 2 米高的一个截面上的流场, 图中箭头颜色深浅代表风速大小. 由图可见, 当 10 米风速在 4.5m/s 时在街区上空风速较大; 在街道峡谷内有明显的涡旋形成, 且涡旋的中心靠近迎风面, 涡旋的风速远小于街区上空的风速, 在背风侧较高建筑物后面, 风速很小. 这些结论与其他数值模拟和实际观测结果是一致^[7-9], 也进一步说明将 Fluent 用于复杂的街区可以得到合理的结果.

由图 4-14-Graph10 可发现, 建筑物的布局对风速大小造成了明显影响. 在上风向靠近风速入口的十口街道, A 分支上的风速比较大, 尤其是进风口, 在观察区 1 的位置最大风速达到 3.6 m/s 左右, 主要是由于建筑物迎风面的阻挡, 这一区域的气流只能集中从建筑物间的街口进入, 因而动能集中, 风速较大. 但沿着 AB 方向有较长距离的传输 (800m) 等到第二个十字路口时风速已减为 3m/s 了, 当到达 B 口时已衰减为 2.6m/s 了. 从风场分布可以看到在街区中心线风速比靠近两边建筑物的风速要高, 这是因为由于建筑物和地面有摩擦力而降低了风速.

在 C D 和 EF 分支上, 风向与街道成 90° 角, 街道峡谷内有涡旋存在, 也使得街区上空部分动能被输运到街道峡谷内, 再加主要因为 AB 分支进风口获得的风速动能有一部分被分配给这些区域, 因此迎风面的风速要高于背风面的风速, 由于传输的距离 AB 分支进风口获得的风速动能, 到达第二个十字路口时风动能有所衰减, 所以 EF 分支上获得的风速动能就比 CD 分支上获得的风速动能小, 在 CD 分支的涡旋比 EF 分支上的涡旋要强, 我们在风速分布图上也可以看到: 观察区 10、11 的风速为 1.14m/s, 观察区 8、9 的风速为 0.57m/s.

由图 4-13-Graph9 可知, 10 米风速在 2m/s 时, 风速场的分布基本和上述相同只是各观察区的风速大小有所变化.

(2) 当风向与主干道 AB 成 45° 角时

由图 4-16-Graph12 可发现为 2 m 高度上风速分布, 风向为 45° 角的情况. 从图可见与风向为 0° 角的情况中的分布有着很大的不同. A、D、F 为风速入口, 在观察区 3、7、8、10 位置形成强弱不同的涡旋, 可以看到 7 区的涡旋最弱, 8 区的涡旋次之, 3、10 区的涡旋最强.

在第一个十字路口 2 区, 由于 A、D 入口风速的共同作用下分速是 1.65m/s, 而在 3、10 区形成了两个强涡旋最大风速是 2.74m/s. 在第二个十字路口 6 区, 由于 F 口为进风口风速为 2.6m/s 而 5 区的来风只有 1.1m/s 从而在 7、8 区形成一强一弱两个涡旋.

由图 4-15-Graph11 可知, 10 米风速在 2m/s 时, 风速场的分布基本和上述相同只是各观察区的风速大小有所变化.

4.4 街区模型 CO 浓度场的数值模拟与分析

街区汽车尾气排放的 CO 的主要影响对象是路边的行人和两旁建筑物内的居民。路边行人高度主要是离地面 2 米处，本文主要模拟的是离地面 2 米处的 CO 浓度场分布。Fluent 软件在模拟浓度场时有一定的局限性，要先把污染物的质量浓度 (mg/m3) 转化为体积比浓度 (ppm)。本文中 CO 浓度的体积比浓度为 0.49e-4ppm。

4.4.1 街区模型 CO 浓度场的模拟方案

由于浓度场的分布主要受风速场的分布影响较大，而由上节论述和前人的结论可知当街区高宽比 $1 < H/L < 2.1$ 时风速场的变化不大，所以本文在考虑 CO 浓度场模拟方案时只设计了 $H/L=2$ 时的方案如表 4-3 所示。

表 4-3 CO 浓度场模拟方案表

街区高宽比 H/L	风向与主街道 AB 的 加角 (度)	街道 10 米处的风 速 (m/s)	街区 2 米处风速场
2(80m/40m)	0°	2	Graph13
		4.5	Graph14
	45°	2	Graph15
		4.5	Graph16

如图 4-2 模型平面示意图,我们把 2 米处街区的浓度场划分为 11 个观察区域，记录并比较各观察点的浓度变化。

4.4.2 计算结果

按照我们设计的表 4-3 CO 浓度场模拟方案表，通过 Fluent 的模拟计算我们可以得到一组街区 2 米处的 CO 浓度场分布图形 (Graph13-Graph16)：

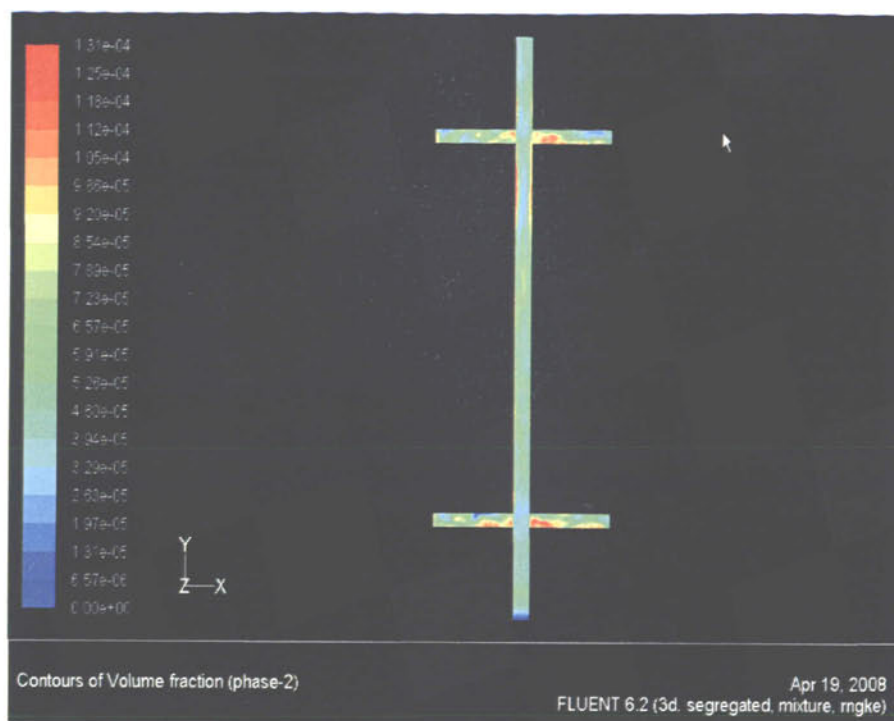


图 4-18 街区 2 米处 CO 浓度场-Graph13

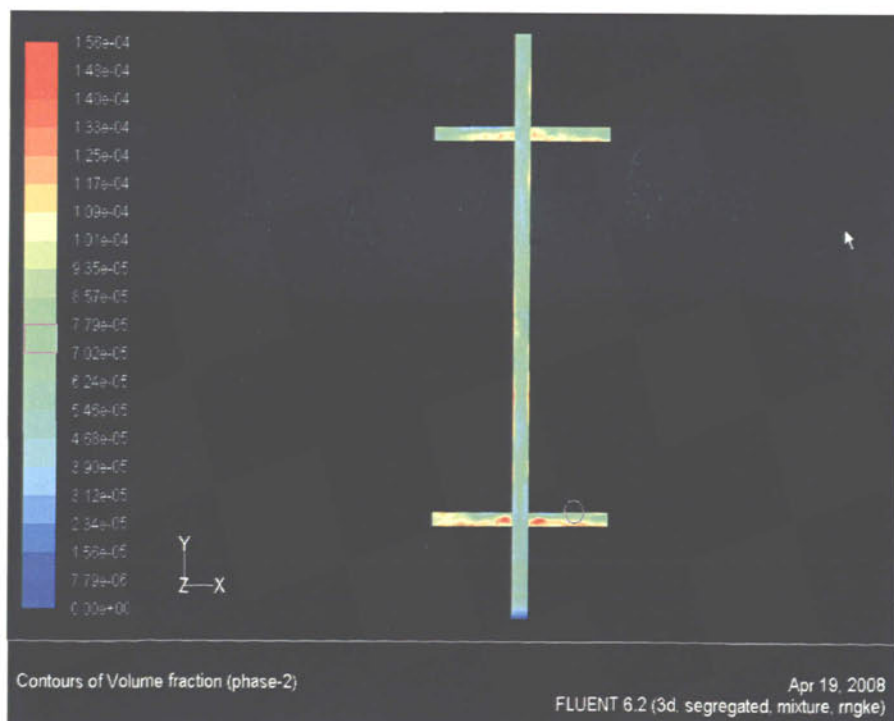


图 4-19 街区 2 米处 CO 浓度场-Graph14

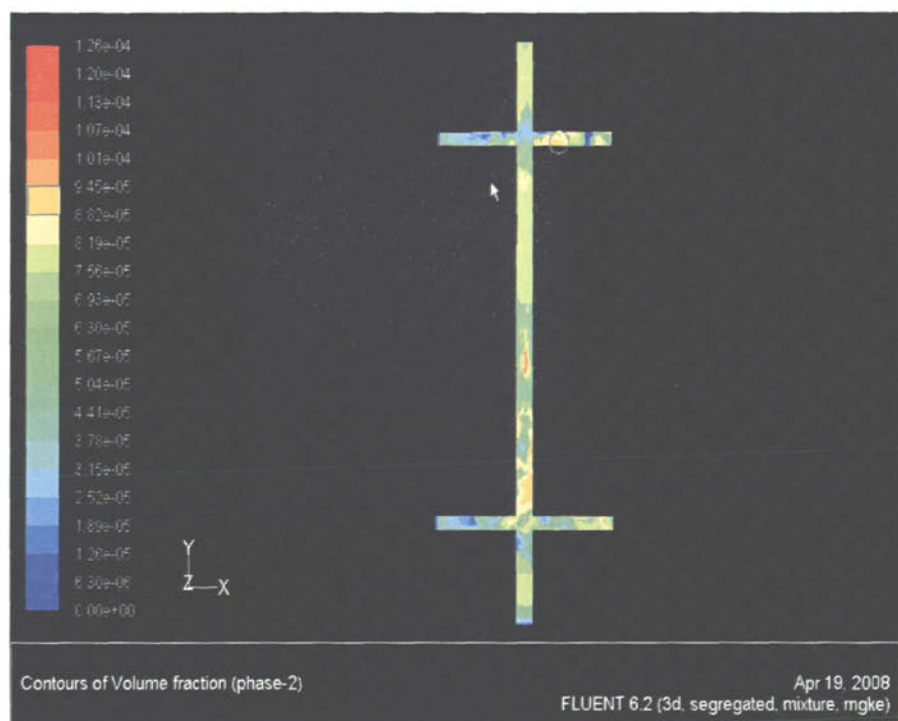


图 4-20 街区 2 米处 CO 浓度场-Graph15

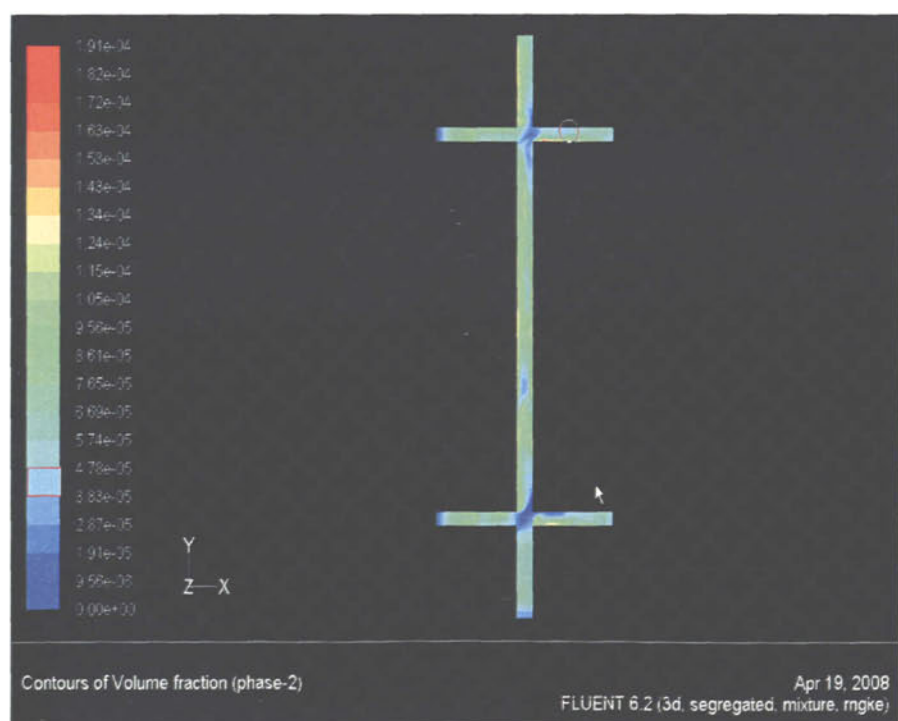


图 4-21 街区 2 米处 CO 浓度场-Graph16

4.4.3 结果分析

表 4-4 街区 2 米处 CO 浓度场各观察点数据统计表

观察点 浓度场 (ppm)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Graph13	4.6e-5	3.94e-5	5.26e-5	5.26e-5	5.26e-5	4.6e-5	3.94e-5	5.26e-5	1.12e-4 /5.26e-5	1.12e-4 /5.26e-5	1.25e-4 /6.57e-5	1.25e-4 /6.57e-5
Graph14	5.46e-5	3.9e-5	7.02e-5	7.02e-5	1.09e-4	6.24e-5	6.24e-5	1.09e-4	1.25e-4 /7.79e-5	1.25e-4 /7.79e-5	1.56e-4	1.56e-4
Graph15	8.19e-5	6.93e-5	9.45e-5	1.07e-4	8.19e-5	3.15e-5	3.15e-5	8.19e-5	9.45e-5	3.15e-5	8.19e-5	2.52e-5
Graph16	6.69e-5	1.91e-5	7.65e-5	9.56e-5	1.05e-4	8.61e-5 /2.87e-5	1.24e-4 /7.65e-5	1.24e-4 /7.65e-5	1.53e-4 /4.78e-5	6.69e-5	1.34e-4 /5.74e-5	6.69e-5

(1) 当风向与主干道 AB 成 0° 角时

如图 4-19-Graph14 中给出解域内 2 米高的一个截面上的 CO 浓度场, 图中颜色深浅代表浓度大小. 由图可见, CO 浓度分布与风场和涡旋分布紧密相关. 在 2 米高度上, CO 主要集中在街道内部, 街区外 CO 浓度几乎为 0. 在十字街道 AB 分支上, CO 浓度相对较小, 尤其在进风口 A 端, 由于风速较大, CO 被较快地往远端输运, CO 浓度几乎为 0. 在第一个十字路口 2 区内 CO 浓度只有 $3.9\text{e-}5\text{ppm}$ 低于平均浓度 $4.9\text{e-}5\text{ppm}$, 随着 CO 的继续传输到了 7 区是 $1.09\text{e-}4\text{ppm}$, 并且由于街区两边靠近墙壁的范围风速小所以 CO 的浓度更高达 $1.33\text{e-}4\text{ppm}$ 对街区两旁的行人和屋内居民健康有直接的影响。

在 CD 分支和 EF 分支上, 由于涡旋的形成和风速较小, 风对 CO 输运效率较低, CO 浓度相对较高, 在 10、11 区高达 $1.56\text{e-}4\text{ppm}$, 在 8、9 区为 $1.4\text{e-}4\text{ppm}$. 由于在 CD 分支上涡旋比较强, 而且从 AB 分支上分得的水平风动能比较大, 所以 CO 累积的就比较多且向 CD 两端推进的就比较远; EF 分支上涡旋比较弱, 而且从 AB 分支上分得的水平风动能比较小, 所以 CO 累积的相对来说就比较少且向 CD 两端推进的也比较近。

由图 4-18-Graph13 可知, 10 米风速在 2m/s 时, 浓度场的分布基本和上述相同只是各观察区的浓度大小有所变化. 由于风速小所以在第二个十字路口周围区域 CO 累积的较多。

(2) 当风向与主干道 AB 成 45° 角时

由图 4-21-Graph16 可发现为 2 m 高度上 CO 浓度分布, 风向为 45° 角的情况. 从图可见 CO 浓度最高值 $1.53\text{e-}4\text{ppm}$ 左右, 比 0° 角时的最高值小, 但街区内 CO 浓度的平均水平较高, 街道内大多数区域的 CO 浓度大于 0° 角时中分布, 归因于在进风口的风矢量以 45° 角切入, 由建筑物阻挡, 入口处各有一个相对较小风速, 在这种情况下, 风对 CO 的输运效率低, 污染物容易累积到比较高的浓度值, A、D、F 为风速入口, 在入口处 CO 浓度值很小, 由于在 3、10 区位置形成两个涡旋, CO 在此被累积和输送, 在背风面 CO 浓度较高 $1.34\text{e-}4\text{ppm}$, 由于 A、D 入口和涡旋的共同作用下, 第一个十字路口 CO 的浓度却很低。

在第二个十字路口, 由于 E 入口风速大而从 A 方向吹来的风由于长距离的传输风动能变小两者的共同作用下, 再加上 7、8 区的涡旋作用 CO 浓度在此也较高 $1.53\text{e-}4\text{ppm}$, 但由于 AB 方向的风速小, CO 传输的慢, 在 7 区内堆积的就更多. 与 0° 角相比, 在 2 m 高度上有更多 CO 被输送到街区以外, 在 C、D

出风口外比较远的地方, 仍然有 CO 浓度值存在。

由图 4-20-Graph15 可知, 10 米风速在 2m/s 时, 浓度场的分布基本和上述相同只是各观察区的浓度大小有所变化。由于风速小 CO 传输的比较慢, 除了进风区外, 其它区域的 CO 分布比较均匀。

综上所述, 街区内 CO 浓度分布由于风向、风速不同会产生很大差异。风向为 0° 角时, 街区内的大多区域 CO 浓度较低, 但会出现局部浓度很高的现象; 风向为 45° 角时, 街道内 CO 浓度分布相对更均匀, 整体浓度水平较高, 但极大值小于 0° 角风向时的情况。两种风向下, 风速小 CO 传输的慢, 浓度分布比风速大时要均匀。总的说来, 建筑物的存在, 对街区风场, 进而对 CO 的浓度场产生了很大影响; 而不同的风向、风速条件对同一街区的风场与 CO 浓度场也有影响, 二者共同作用, 决定街区内的空气污染状况。

4.5 本章小结

从各模型模拟的结果看:

(1) 在街区高宽比 H/L 为 1、1.5、2 时, 2 米高处风速场的分布基本上没有什么太大的变化, 再一次验证了前人的风洞实验结果。

(2) 在风向与街道成 90° 角时, 街区内有涡旋的存在而且当 $1 < H/L < 2$ 时只有一个反方向的大涡旋, 在建筑物背风面有一个向上爬升的气流。

(3) CO 浓度的分布与街区风速场和涡旋有着密切的关系。风向为 0° 角时, 街区内的大多区域 CO 浓度较低, 但会出现局部浓度很高的现象; 风向为 45° 角时, 街道内 CO 浓度分布相对更均匀, 整体浓度水平较高, 但极大值小于 0° 角风向时的情况; 风速越大 CO 传输的就越快, 风速小 CO 分布的就越均匀; 在建筑物的迎风面 CO 累积的浓度就比较低, 在背风面由于涡旋的作用 CO 累积的浓度就比较高。

(4) 街区建筑物布局、风向、风速共同决定街区内空气污染状况。

第 5 章 结 论

5.1 结论

流体的运动有极大的复杂性,特别是湍流,人们对其规律的认识还存在很大的局限。实验研究作为研究流体运动的主要和常规手段,不仅在研究经费、时间、场所等投入上较大,而且对实际工程中大量存在的复杂边界条件区域内流动,由于其复杂性和测量的可操作性差等原因,很难获得流场的详细信息。

而利用计算流体动力学进行数值模拟,可以得到整个流场的详尽信息,并且其具有对各种模型适用的广泛性,能提供详细的数据报告,良好的可视性后处理功能,可反复修改操作等许多优点,因此,其作为研究流体运动的一种方法,已被越来越多的使用和重视。但鉴于目前人们对流动认识的局限性以及计算机性能的限制,其很多参数设置是通过大量实验总结来确定,还不能做直接数值模拟等。但是随着人们对流动研究的深入,计算机技术的快速发展,数值模拟方法会有更大的优势。

本论文利用 CFD 软件 Fluent 来对街区模型风速场和机动车排放污染物 CO 浓度场进行数值模拟。研究对路边行人最有影响的 2 米高度风速场和 CO 浓度场分布情况。模型简化了街道,考虑一条主干道(AB 长 1260m,宽 40m)与两条次干道(CD、EF 长 440m,宽 30m)垂直相交构成两个十字路口的街道以及邻街的第一排建筑物。不考虑化学变化,考虑了有实际意义的 CO 源强,在街区高宽比 H/L 为 1、1.5、2,两种风向,两种风速条件下进行了数值模拟。模型解域为 $840\text{ m} \times 1660\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的立方体“抠除”地面建筑物后的空间。

通过对模拟结果的比较分析,可以得出以下几点结论:

(1) 在街区高宽比 H/L 为 1、1.5、2 时,2 米高处风速场的分布基本上没有什么太大的变化,再一次验证了前人的风洞实验结果。

(2) 在风向与街道成 90° 角时,街区内有涡旋的存在而且当 $1 < H/L < 2$ 时只有一个反方向的大涡旋,在建筑物背风面有一个向上爬升的气流。

(3) CO 浓度的分布与街区风速场和涡旋有着密切的关系。风向为 0° 角时, 街区内的大多区域 CO 浓度较低, 但会出现局部浓度很高的现象; 风向为 45° 角时, 街道内 CO 浓度分布相对更均匀, 整体浓度水平较高, 但极大值小于 0° 角风向时的情况; 风速越大 CO 传输的就越快, 风速小 CO 分布的就越均匀; 在建筑物的迎风面 CO 累积的浓度就比较低, 在背风面由于涡旋的作用 CO 累积的浓度就比较高。

(4) 街区建筑物布局、风向、风速共同决定街区内空气污染状况。

(5) 由于实测资料的缺乏, 对本文模拟的结果分析偏向于定性分析; 另外, 尽管本文模拟的街道十字路口建筑物布局比较复杂, 但就整体而言, 计算模型仍是非常简化的。今后可以考虑与实际情况结合, 模拟更为复杂和真实的街区, 并用实测资料对模拟的准确性进行进一步验证

(6) 由本文的模拟结果可见, Fluent 软件功能强大, 能模拟较复杂的建筑物布局对大气环境的影响, 利用 Fluent 进行分析得出的结果比较合理, 因而在与街区大气环境相关的问题上有良好的应用前景, 诸如小区、室内车库的污染物分布、大型桥梁设计、大型体育场馆和公共设施建设的环境影响评价, 分析街道拓宽、建筑物改建等对环境的影响, 得出合理建设方案等等。

5.2 问题建议

由于模型的简化, 很多问题没有被考虑:

1、本模型模拟时只考虑了街区两边建筑物等高, 而且建筑物屋顶是平的情况; 没有考虑街区两边建筑物高度不对称, 建筑物屋顶是尖的情况。

2、本模型只考虑了 CO 的温度变化, 没有考虑整个街区在太阳照射作用下温度的变化。

3、本论文只模拟了 CO 的浓度场, 没有模拟街区机动车排放的 NO_x 和其它污染物的变化。

4、本文所研究的街道峡谷只是理想街道模型, 实际街道是很复杂的, 因此, 街道峡谷内流场及机动车排放污染物扩散规律仍需进一步研究。

5.3 问题的展望和构思

通过对本次论文课题的学习和研究,我深刻体会到机动车排放尾气的污染与生活其中的我们每个人的健康密切相关。为了能够更加准确,实时的模拟城市范围的各个街区的污染状况,及时汇总城市街区的污染信息给城市相关环境保护管理决策部门使用,我结合当今世界使用最广泛的城市街区数值模式构思了一个城市范围的街区交通污染管理监控系统。

地理信息系统(Geographic Information System)是以地理空间数据库为基础,在计算机软硬件的支持下,对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示,并采用地理模型分析方法,适时提供多种空间和动态的地理信息,为地理研究和地理决策服务而建立起来的计算机技术系统。在国外, GIS 正在广泛应用于环境研究的各个领域, EIA(环境影响评价)是其中主要领域之一。GIS 与机动车尾气污染迁移扩散模型结合的研究国内刚刚起步。由于此项研究结合了城市的具体交通、地形和气候条件,再辅之强有力的图形表达方式,所以它一方面可以利用实测值,通过模型计算,得到有关污染物的浓度分布图,了解各污染源的空间分布及超标情况,同时也可进行全区环境质量的综合评价;另一方面通过改变交通状况和路网条件,研究汽车尾气污染物的扩散发展趋势,为城市规划、制定环保政策等提供决策依据。

(1) 构思的管理监控系统采用由美国加利福尼亚州交通部开发的第 4 代线源空气质量模式 CALINE4(可模拟 $H/L \leq 1$ 的平坦道路、“路堤”、“桥梁”和“区段的空气污染浓度”)和丹麦国家环境研究所开发的 OSPM 模型(可模拟 $H/L > 1$ 的街道峡谷空气污染浓度)。

(2) 采用 Visual Basic .net 为 GIS 系统开发语言,建立城市交通污染控制管理监控信息系统的统一平台;使用 MapObjects 2.4 作为 GIS 控件,进行图层控制及扩散显示;使用 SQL Server2005 作为用户端和联络后台数据库的本地数据库;系统集成了研究所采用的计算方法及扩散模型,可以对污染状况进行定量计算并通过地图进行结果的直观表达。

系统的方案如下:

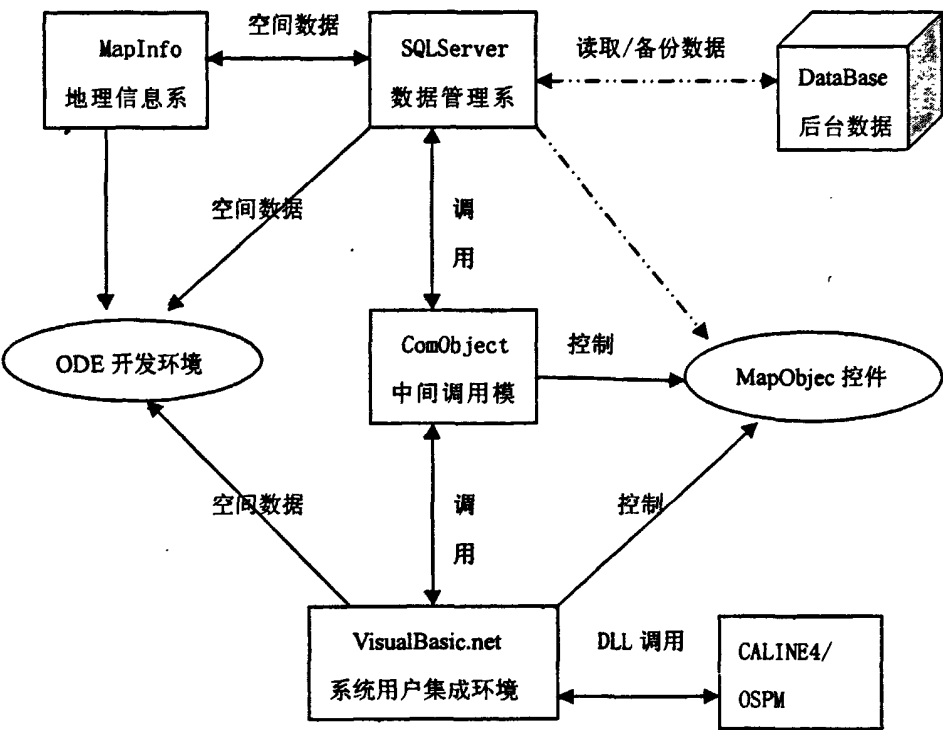


图 5-1 系统方案图

系统拓扑图:

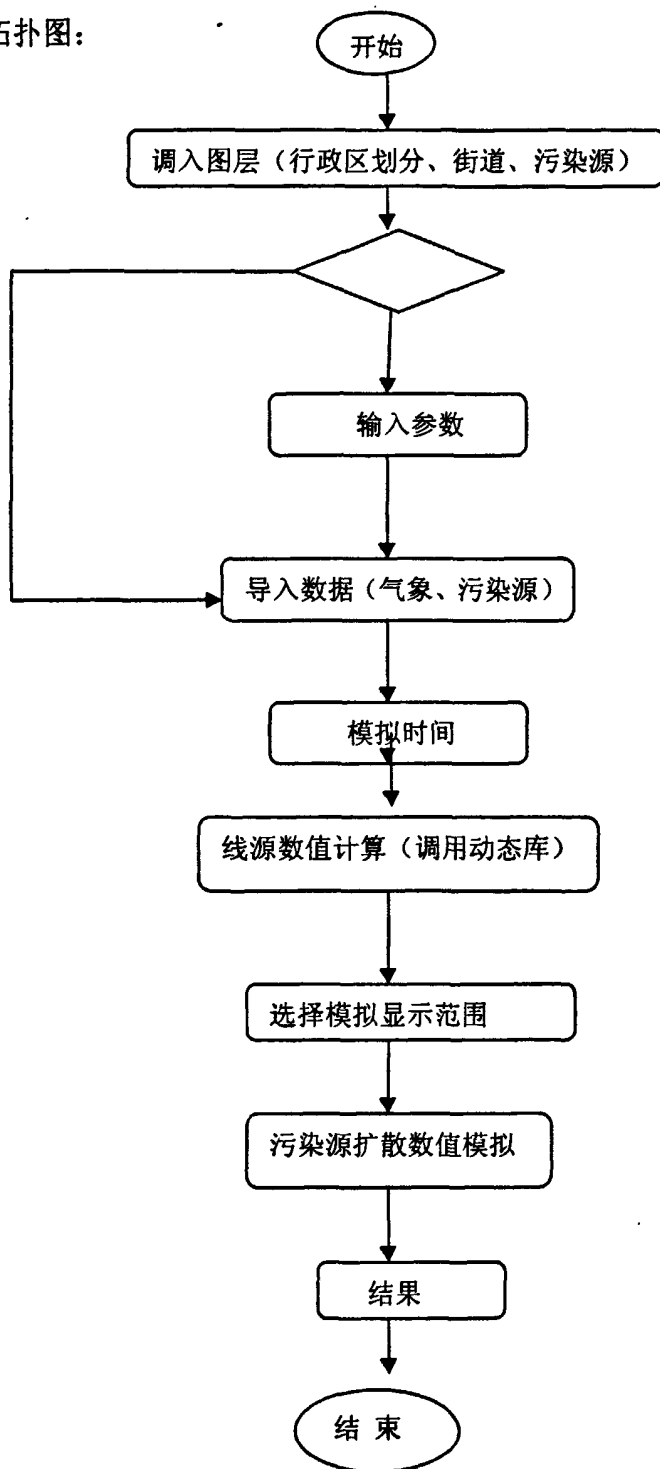


图 5-2 街区污染模拟 UML 模型活动图

致 谢

在本论文顺利完成之际，首先感谢我的导师王文勇副教授。在 2 年的研究生学习期间，王老师的指导使我对大气污染控制及环境规划与评价方面的知识有了较全面的认识和一定的实践。并且无论是学习还是生活上，他都给予我很多帮助。他丰富的理论知识实践经验、严谨的治学态度、身体力行的工作作风和人格魅力使我印象深刻受益匪浅！本次论文的完成凝聚着王老师的心血。在此，我以万分崇敬之心感谢导师的鼎力支持和帮助！

感谢环境 06 界的各位同学，在本人学习、生活上及论文阶段的热心帮助。愿友谊长存。

感谢清洁能源网论坛、流体中文网论坛和迅雷网站提供的 CFD_Fluent 资料及对我热心帮助的朋友。

感谢我的同门沈强、许银春和陈涛以及师弟师妹们的热心帮忙，我的成果是和大家的辛苦工作分不开的。

衷心的感谢我的父母多年来在物质和精神上的极大帮助激励，我将会以实际行动报答他们的养育之恩！特别感谢我的女朋友在我生活学习上的关心和照顾，激励我认真完成全部论文的撰写。

参考文献

- [1] Helmut Mayer, Air Pollution in cities, Atmospheric Environment 33(1999) 4029-4037
- [2] 谢邵东, 张远航, 唐孝炎。我国城市地区机动车污染现状与趋势, 环境科学研究, 2000, 13 (4): 22-25
- [3] 李岳林、王生昌等: 交通运输环境污染与控制, 机械工业出版社, 2003
- [4] 魏名山等, 汽车与环境, 化学工业出版社, 2005
- [5] 陈长虹等, 上海市机动车排气污染负荷的估算, 上海环境科学, 1997, 16 (6): 26-29
- [6] 陈长虹等, 上海市机动车排污状况与污染控制战略, 上海环境科学, 1997, 16 (1): 28-31
- [7] 陆书玉, 上海市机动车污染物及其控制对策, 上海环境科学, 1998, 17 (3): 1-3
- [8] 杨边日, 上海带着环境忧虑进入私人汽车时代, 世界环境, 1998, (4): 44
- [9] 张凌东, 柯智明, 汽车排气污染与防治, 城市环境, 2002, 16 (3): 40-42
- [10] 上海市环境科学院, 《世界银行—上海城市交通项目: 减少上海城市车辆排污危害的战略》, 1997.9
- [11] 伏晴艳, 上海市空气中 NO_x 的污染现状及分担率, 上海环境科学, 2001, 20 (5): 224-226
- [12] 李莉, 束炯, 李朝颐等, 上海市氮氧化物污染与气象条件关系特征分析, 安全与环境学报, 2004, 4(1): 36-39
- [13] 范秀英, 张微, 韩圣惠, 我国汽车尾气污染状况及控制对策分析, 环境科学, 1999, 20(5): 102-108
- [14] Matthias Schmidt, Ralf-Peter Schafer, An integrated simulation system for traffic induced air pollution, Environmental Modelling & Software 13 (1998) 295-303
- [15] 贾艳杰, 我国大城市汽车废气污染问题及其治理对策 人文地理 1997, 12 (3): 48
- [16] 王宝民, 柯咏东, 桑建国, 城市街谷大气环境研究进展, 北京大学学报

(自然科学版), 2005, 1(1):146-153

- [17] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述. 上海理工大学学报, 2002. 24(2): 137-143
- [18] Johnson W B, Ludwig F L, Dabberdt W F. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide[J]. J Air Pollut Control Assoc, 1973, 23:490-495.
- [19] Nicholson S E. A pollutant model for street-level air[J]. Atmospheric Environment, 1975, 9:9-31.
- [20] Yamartino R J, Wiegand G. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20:389-400.
- [21] Berkowicz R. Street scale models[C]//Fenger J, Hertel O, Palmgren E. Urban Air Pollution-European Aspects. Boston:Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [22] Buckland A T. Validation of a street canyon model in two cities[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 52:255-267.
- [23] Depaul F T, Sheih C M. Measurements of wind velocities in a street canyon[J]. Atmospheric Environment, 1986, 20:455-459
- [24] Hotchkiss R S, Harlow F H. Air pollution transport in street canyons (EPA -R4-73-029, NTIS PB -233252) [R]. Los Alamos: Prepared by Los Alamos National Laboratory for US Environmental Protection Agency, 1973.
- [25] Zoumakis N M. A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentration in urban street canyons[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(24):3719-3725.
- [26] Liu J J, Chan C C, Jeng F T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei, based on actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation method[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28:2361-2368.
- [27] Murakami S, Mochida. Three dimensional numerical simulation of

- turbulent flow around buildings using the K-turbulent model[J]. Building&Environment, 1989, 24:51-64.
- [28] Jean S, Mestayer P G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(15):2659-2677.
- [29] Liu C H, Mary C B rath. Large-Eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon[J]. J App Meteor, 2002, 41:660-673.
- [30] I G Capeluto, A Yezioro, E Shaviv. Climatic aspects in urban. design-a. case. study. Building. and. Environment. 2003, 38:827—835
- [31] C H Chang, R N Meroney. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001, 89(14-15):1325—1334
- [32] 金均, 周安国, 赵铮红等:公路汽车尾气扩散模式研究, 上海环境科学, Vol. 16> No. 10, 18-21, 1997
- [33] 龚慧明:城市交通路口机动车排气污染研究,、北京大学硕士学位论文, 2001
- [34] 周洪昌等:城市街道汽车排放物扩散过程的风洞实验, 同济大学学报, Vol. 22, No. 2, 1994
- [35] 傅立新, 郝吉明, 何东全等. 街道峡谷汽车污染模拟研究. 清华大学学报, 1999, 39(6):99—101
- [36] 李磊, 胡非, 程雪玲, 韩浩玉等. Fluent 在城市街区大气环境中的一个应用. 中国科学院研究生院学报, 2004, 10(4):476—480
- [37] 刘宝章, 康凌, 林官明等, 澳门荷兰园街汽车尾气扩散规律实验研究, 环境科学学报, 2000, 9:27-33
- [38] 谢拯, 吴志军, 黄震等, 城市街道峡谷机动车排气污染扩散的研究现状, 吉林工业大学自然科学学报, 2001, 10(4):91-95
- [39] 彭军, 张明, 王体健等, 公路和城市街渠机动车大气污染物扩散模式发展综述, 南京气象学院学报, 2005, 6(3):423-432
- [40] 程雪玲, 胡非, 影响街区峡谷浓度扩散的因素, 城市环境与城市生

- 态, 2004, 4(2):39-41
- [41] 吕萍, 袁九毅, 张文煜, 城市街谷几何结构对街谷内流场及污染物浓度场影响的数值模拟, 高原气象, 2004, 8(4):534-539
- [42] F.Gerdes, et al: Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon, Journal of windengineering and industrial aerodynamics, 1999, 82
- [43] F.Caton, et al: Dispersion mechanisms in street canyon, Atmospheric Environment, 2003, 37
- [44] 兰涛: CALINE4 模型在西安市主干道机动车 CO 污染扩散计算中的应用研究, 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2006
- [45] 魏光华: 城市街道峡谷机动车排气污染扩散模型研究, 上海交通大学硕士学位论文, 2000
- [46] 郝吉明, 马广大等: 大气污染控制工程, 高等教育出版社, 1989
- [47] 周洪昌等: 城市街道汽车排放物扩散过程的风洞实验, 同济大学学报, Vol.22, No.2, 1994
- [48] 魏雄辉, 庞岩, 汽车尾气对北京市大气环境造成了严重的污染. 环境保护, 1998, 4:23
- [49] 周雪漪. 计算水力学. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [50] 郭鸿志. 传输过程数值模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- [51] 陶文铨. 数值传热学 (第二版). 西安交通大学出版社, 2001
- [52] Fluent Inc., FLUENT User' s Guide. Fluent Inc., 2003
- [53] Marzio Piller, Enrico Nobile, J. Thomas, DNS study of turbulent transport at low Prandtl numbers in a channel flow. Journal of Fluid Mechanics, (458):419-441, 2002
- [54] J.G. Wissink, DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes. International Journal of Heat and Fluid Flow, 24(4):626-635, 2003
- [55] H.K.Versteeg, W.Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Wiley, New York, 1995
- [56] M.B. Abbott, D.R.Basco, Computational Fluid Dynamics-An Introduction for Engineers. Longman Scientific & Technical, Harlow, England, 1989

-
- [57] A.A. Feiz, M. Óuld-Rouis, G.Lauriat, Large eddy simulation of turbulent flow in a rotating pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24(3):412-420, 2003
- [58] Mary Ivan, Sagaut Pierre, Large eddy simulation of flow around an airfoil near stall. *AIAA Journal*, 40(6):1139-1145, 2002
- [59] D.G.E. Grigoriadis, J.G. Bartzis, A. Goulas, Efficient treatment of complex geometries for large eddy simulations of turbulent flows. *Computers and Fluids*, 33(2):201-222, 2004
- [60] L. Shen, D.K.P. Yue, Large-eddy simulation of free-surface turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, n440:75-116, 2001
- [61] R.E. Julian, K.Smolarkiewicz, Eddy resolving simulations of turbulent solar convection. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 39(9):855-864, 2002
- [62] J.C. Li, Large eddy simulation of complex turbulent flows: Physical aspects and research trends. *Acta Mechanica Sinica*, 17(4):289-301, 2001
- [63] P. Rollet-Miet, D. Laurence, J. Ferziger, LES and RANS of turbulent flow in tube bundles. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20(3):241-254, 1999
- [64] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [65] 韩占忠, 王敬, 兰小平. 流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004
- [66] 郎道. 流体力学. 高等教育出版社, 1983: 124-130
- [67] C.J. Chen, S.Y. Jaw. *Fundamentals of Turbulence Modeling*. Taylor&Francis, Washington, 1998
- [68] V. Yakhot, S. A. Orszag. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Science Computation*, 1986, (1):3—51
- [69] 魏雄辉, 庞岩. 汽车尾气对北京市大气环境造成了严重的污染. *环境保护*, 1998, 4:23
- [70] 中国国家环境保护局. 环境影响评价技术导则. 1993
- [71] Hassan A A, Crowther J M. Modelling of fluid flow and pollutant
-

dispersion in a street canyon. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 52:281—297

[72] Lee I Y, Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in Urban Street Canyons. Atmospheric Environment. 1994, 28:2343—2349

[73] 张 宁, 蒋维楣. 城市街渠内气流的数值模拟与分析. 南京大学学报(自然科学), 2000, 36(6):760—772

攻读学位期间发表的论文

- [1] 张钊, 王文勇. 四川华蓥山生态旅游的研究, 安徽农业科学, (已录用)
 - [2] 张钊, 王文勇. 四川省达州市区 SO₂ 污染物的大气容量规划的研究, 安徽农业科学, (已录用)
-