

天津大学

硕士学位论文

非稳态污染物对建筑小区影响的数值模拟

姓名：谭子骏

申请学位级别：硕士

专业：环境科学

指导教师：尤学一

20070601

中文摘要

随着我国城市化进程的快速发展及生态环境的不断恶化,异常天气(大风、沙尘暴、持续高温等)和传染性疾病的出现日益频繁,人口密度很高的建筑群产生的环境安全性问题也日益突出,已经威胁人民的生命安全。对建筑小区周围的非稳态微生物污染物的扩散规律的研究,成为目前研究的重要领域。

本文采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型的数值模拟方法研究病毒污染物对建筑小区的影响。由于微生物病毒在一定的条件下能诱发继发感染,产生新的病毒污染源,所以在模拟中考虑了继发感染情况,诱发的新污染源与原污染源共同作用,影响建筑小区周围的环境。

利用病毒微生物生长动力学模型计算的病毒生长曲线作为非稳态污染源,进行扩散模拟,得出了一般性病毒微生物污染物的影响范围,建立了传染性疾病预防系统。

同时研究了流感病毒及其生长曲线,并将其作为源强进行扩散模拟,得到流感病毒对建筑小区的影响范围。比较了它与一般性病毒微生物扩散相似和不同。

本文还利用三维模型对建筑小区中流感病毒的扩散进行模拟,在没有考虑继发感染的条件下,得到污染源对建筑小区的影响,并与二维的结果进行了对比。发现在一定情况下,二维模拟水平面结果与三维结果具有相似性,因此,可以先利用二维模拟优化建筑群结构和建立传染性疾病预防系统,然后再利用三维模拟结果验证,大大节约了计算时间,为建立时时预警、提出即时优化疏散方案提供了可能性。

总之,本文结果可为城市大气质量多尺度模型的建立,为可在空气中传播的有害微生物的扩散模型建立和优化疏散方案制定提供理论基础。

关键词: 非稳态微生物污染源 $k-\varepsilon$ 湍流模型 建筑群结构 病毒扩散

ABSTRACT

With the densification of population in central urban area and the deterioration of city ecological cycle, especially in developing countries, the airborne disease virus is becoming a new challenge for human. A numerical model to simulate the transport of airborne disease around buildings is established in this thesis. The numerical model can be applied to forecast the spread of airborne disease virus around buildings. It is also favorable to establish virus-alarm systems and make suitable evacuation plans.

A two-dimensional numerical model with RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is developed to simulate the diffuse and pollution concentration of the virus in a group of five buildings. The population dynamic model of virus growth is introduced as an unsteadily pollutant source. By considering secondary infection, the distribution of time-dependent concentration of disease microbial pollutant around the group of buildings and that on the sidewalls of buildings is obtained. With known pathogenic concentration, the infectious area can be determined. For the model application, the development of the flu virus around building is studied.

The above two-dimensional model is further developed to a three-dimensional numerical model. The concentration of the virus in a group of buildings is obtained. It is found that the virus concentration of the two-dimensional results is similar to that of horizontal plane of three-dimensional one. The conclusion suggests that it is possible to simulate by using the two-dimensional model at first to fulfill the purpose of study and to check the applicability of two-dimensional results by making three-dimensional simulation.

KEY WORDS: unsteadily microbe source, $k-\varepsilon$ turbulence model, building configurations, pollutant transport

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 谭子波 签字日期： 2007 年 6 月 19 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名： 谭子波

导师签名： 龙学一

签字日期： 2007 年 6 月 19 日

签字日期： 2007 年 6 月 18 日

第一章 绪论

1.1 研究的背景及意义

改革开放以来,城市住宅建设无论从数量和水平上,都可用“突飞猛进、日新月异”八个字形容。并且人们都十分注重生态环境,不仅包括室内环境,也包括室外环境。由于世界上近年来生态环境持续恶化,各种异常天气频繁出现,如大风、沙尘暴以及持续的反常天气等,还有大量的传染性疾病的蔓延,如非典、禽流感等。比如在非典时期,香港陶大花园大量人员感染 SARS 病毒,而这些染病人员又大多处于发病源的下风向的建筑物内^[1],这就证明了不合理的高层建筑布局会影响传染病对建筑中人员的影响。同时,不合理的建筑设计还会产生其他一些严重问题,比如污染物扩散难、城市热岛等。所以合理的建筑布局也能够很好的提高城市住宅的生活质量。因此,建筑群中产生的环境 and 安全等方面问题的研究不但具有重大的理论研究意义,而且是具有深远的现实意义和应用前景的。

1.1.1 建筑小区中污染物扩散规律的研究现状

建筑小区中大气污染物的扩散研究,就是指在确定的小区内,根据风速、风向以及污染源位置、污染源浓度等等各种因素对污染物扩散情况的影响,确定这个小区中污染物扩散的规律,并且根据这些规律对建筑物的形状以及建筑小区中结构设计提供科学的依据。

以往对污染物扩散规律的研究包括风洞模型试验的模拟以及现场测量等方法,首先要推导得到经验或者半经验公式,再由这些公式预测污染物的传播情况。这些模型试验相当费时、费力,还会受到各种条件的限制,很难完全模拟出整个流动空间中流体流动的全部特征,所以仅仅通过试验来研究全部的扩散规律既不经济也不现实。

建筑小区作为人们生存的聚居地和主要的活动场所,其环境问题也变得日益突出。小区内的气象条件(如:风温湿压等)及大气环境与人们的生活质量息息相关。人们也已经逐渐认识到对城市小区气象及污染扩散研究的重要性。Kaplan 和 Dinar^[2]企图将一种简单的统计方法应用于实际城市小区(1km×1km)流场和污染扩散的模拟;Bruse 和 Fleer 用一个三维数值模式对理想的城市小区(255m×

235m)内的气象场进行了模拟；苗世光等建立了一个城市小区尺度三维非静力 $k-\epsilon$ 模式，并对一实际城市小区(1250m×1200m)内的气象场和污染扩散进行了模拟和风场的初步检验。

将建筑空间作为研究对象进行数值模拟，特别是应用计算流体力学（CFD）对建筑物周围流场进行研究，是当今国际上一个十分重要的研究方向。也正是这些对流场的研究成果，为建筑小区内污染物扩散的研究打下了基础。污染物的排放、汽车尾气的排放、突发灾害事件以及在居民小区、街道以及工业居民混合区内造成的污染等等^[3]都可以利用 CFD 进行模拟研究。所以这些研究可以为规划城市建设，减少城市中空气污染，尤其是对人口众多的建筑小区内污染环境问题的处理作出指导性工作。

如今的 CFD 技术还仅仅只能对城市建筑小区尺度级（数十米至数百米水平范围）的模型进行准确研究。该尺度下建立的污染物扩散空气质量模型中，对建筑物单体及建筑群周围空气流动场的模拟是至关重要的，这正是 CFD 技术的特长之处。在这种情况下，现阶段的 CFD 技术便能够比较准确得将建筑物单体以及建筑群周围的空气流动特征准确的模拟出来，从而可以直观且清楚的看到建筑物周围污染物的分布情况等。

针对建筑单体及建筑群中污染物扩散规律的研究，现在还处于研究阶段。从建筑物形状以及建筑群结构的多样性来看，即使对于没有污染物存在的建筑群风场的研究也很不全面，如在北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系的研究中^[4]对方庄芳星园小区周围风场的研究、MTUTAR 的规则建筑风场的研究等，研究的也只是一些简单的基本形状。以上这些因素都证明了建筑小区的污染物扩散研究还有很大的发展空间。

1.1.2 微生物非稳态污染扩散的研究

建筑物周围空气的污染，不仅仅有稳态污染物，还会有一些非稳态污染物的扩散，这都是不能忽视的。比如烟囱的不定时排放、车道上的机动车尾气排放等等。其中还包括很多可在空气中传播的、致病性微生物污染物的扩散^[5]。通过空气的传播，这些能够通过呼吸道传染的疾病，可以由咳嗽和喷嚏产生的微生物气溶胶直接感染易感者。只要存在病源，便会在该区域内产生致病性的气溶胶，这将会使空气中有害的微生物的含量大大升高，空气的环境质量也随之降低。而同时，室内产生的大量致病性气溶胶通过与室外的空气进行交换，并扩散到外界环境中，借助于气流流动传播到更远处，会造成周边空气环境的生物污染以及气源性传染。通常在适度的温度、风力条件下，如果该微生物可在空气中存活的时间

较长,那么它将会以气溶胶的形式随着空气的流动扩散到几十甚至上百公里的地方。这常常会造成大面积的染病区域,不仅包括人类,还有大量的畜禽等会感染上疾病。这种致病性的微生物,有流行于人类的天花、麻疹、流行性腮腺炎、非典型性肺炎(SARS)、流感病毒以及流行于家畜的疯牛病、口蹄疫(FMD)、猪瘟热、禽流感^[6]等等,它们都曾经给人们带来巨大的危害^[7]。人们可以从很多方面阻止其传播扩散,其中也包括尽量减少建筑小区内病毒的传播扩散。

对有害微生物气溶胶在空气中扩散的数值模拟,欧洲科学家最早是应用到口蹄疫的研究过程中^[8]。Donaldson 的研究小组通过在病毒扩散过程中引入了高斯烟羽扩散模型,考虑了风速的影响,模拟了欧洲地区上世纪 80 年代和 2001 年爆发的口蹄疫实例,预测了以空气为传播介质的传染病的影响范围,研究同时还考虑了各种气象、地形因素的修正^[9]。香港科学家也将高斯扩散模型引入到 SARS 病毒的研究中,利用计算流体力学软件如 CFD 以及 FLUENT,根据非典时期的收集到的数据对香港一楼区的 SARS 扩散作出模拟研究^[10]。这些发展都将为用计算机更加精确的模拟微生物气溶胶在空气中的扩散提供条件。然而,对其的研究仍然存在诸多的困难,比如影响气溶胶在空气中扩散的因素有很多,不仅包括发病源的位置、环境中风速风向、温度以及湿度等等因素会对其有影响,还包括微生物气溶胶自身的一些特性,比如微生物气溶胶的来源、种类的多样性、活力易变性、传播的三维性、沉积再生性以及传染的广泛性等等,这些都是研究的难点。

以上对各种微生物气溶胶扩散规律的研究,大多数都仅仅是将扩散源强设定为定值来处理,也就是将它当作一个稳态常量的源强来进行计算。但是,对于微生物自身来说,只要周围环境条件满足,它便会在宿主体内不断的繁衍生长,其数目是不断变化着的。同时,虽然目前对微生物在环境中是否能够繁殖还没有一个确切的结论,但可以肯定的是,将微生物自身的生长变化情况引入计算模型中,可大大增加计算模型的准确性。因此,在本文研究中,将使用病毒群体动力学模型及流感病毒的动力学模型来模拟微生物自身的生长,并以此作为环境中的源强,进行非稳态的微生物气溶胶扩散模拟。

流行感冒、肺结核、肺炎等等传染性疾病都主要是通过人们的呼吸作用,再由空气流动进行传播的疾病。尤其是从 2002 年 11 月以来,SARS 病毒陆续在我国广东、香港、台湾、北京、山西等地 20 余个城市以及世界 30 余个国家被发现,并出现了爆发蔓延的现象。其传播范围之广、传染速度之快在新中国成立以来都是没有发生过的。其中 SARS 疾病是一种很典型的通过飞沫或近距离接触传染的呼吸道疾病。因此,对于这类的传播性呼吸道性质的疾病,控制空气的流动趋势是最有效的防治手段之一。

流行性感冒即流感^[11]在流行病学上最显著的特点为:突然性的暴发,迅速的

蔓延,波及面很广,并且具有一定的季节性(我国北方的流感一般均发生在冬季,而南方多发生在夏季和冬季),每次流行后在人群中总要造成不同程度的超额死亡,死亡者多为年迈体衰或带有慢性疾病的患者。流行性感冒(流感)是由流感病毒引起的急性呼吸道传染病,以其病原的易变性和疾病的传播速度快而著称。其传播的途径主要是通过空气飞沫传播以及直接接触。本世纪曾出现过4次世界性的流感大流行,给人类社会带来了巨大的危害和经济损失。流感已经成为国内外重点研究的内容以及第一个实行全球性监测的传染病。我国幅员辽阔,人口众多,流感防治工作在全球占有重要地位,因为20世纪发生的4次世界性大流行有3次是首发于我国,世界上也公认我国是流感的多发地乃至发源地。

流感疾病的常年频繁发生,对其的预防是一项重要且艰巨的任务,是我国的重点项目,也是世界上的重要课题,所以对流感病毒的扩散规律的研究是具有很大的实际意义和科研价值的。

1.2 FLUENT 的简介

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称为 CFD)是一门用数值计算方法直接求解流动主控方程(Euler 或 Navier-Stokes 方程),以发现各种流动现象规律的学科。它综合了计算数学、计算机科学、流体力学、科学可视化等多门学科。广义的 CFD 包括计算水动力学、计算空气动力学、计算燃烧学、计算传热学、计算化学反应流动,甚至数值天气预报也可列入其中。

计算流体力学是通过计算机数值计算以及图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关的物理现象的系统所作的分析。由于数值模拟相对于实验研究有很独特的优点,比如成本低,周期短,能获得完整的数据,能模拟出实际运行过程中各种状态,对设计、改造等商业或实验室应用起到了重要的指导作用。

FLUENT 是目前处于世界领先地位的 CFD 软件之一,它是一个用于模拟和分析在复杂几何区域内的流体流动与热交换问题的专用 CFD 软件。FLUENT 软件是由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的产品。FLUENT 软件拥有多种优化的物理模型,如理想气体、真实气体模型、多种燃烧模型、污染物生成模型(包括 NO_x 生成及煤灰生成模型)、各种物性参数、旋转系统模型、传热模型、多相流模型、针对外流场与内流场的特定的边界条件等。另外,FLUENT 软件包含了 8 种工程上常用的湍流模型(一方程模型、双方程模型、雷诺应力模型和大涡模拟等)^[12]。每一种模型又有若干种子模型,FLUENT 提供了比其它任何软件都丰富的物理模型^[13]。这些物理模型使得用户能够精确地模拟出无粘流、层流、湍流、化学反应、多相流等复杂的流动现象^[14]。

FLUENT 程序软件是由一下几个部分组成：

- (1) GAMBIT：用于建立几何结构和网络的生成；
- (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：用于从现在的边界网格生成体网格；
- (5) Filters：转换其他程序生成的网络，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 1-1：首先利用 GAMBIT 进行流动区域几何形状的构建、边界类型以及网络的生成，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。

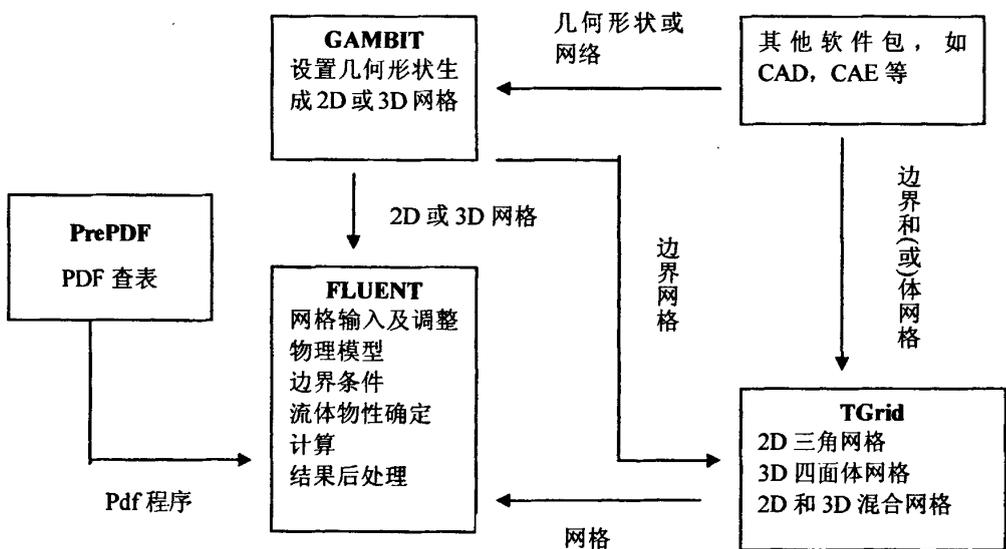


图 1-1 基本程序结构示意图

首先 FLUENT 提供了灵活的网格特性。采用 GAMBIT 的专用的前处理软件，使网格可以有多种形状。对于二维流动情况，可以生成三角形网络以及矩形网格；对于三维流动情况，则可生成四面体、六面体、三角柱和金字塔等等网格；同时还可以生成混合网格；其特别的自适应功能，能够对网格进行细分或者粗化，或生成不连续的网格、可变网格和滑动网格。用户可十分方便的使用结构网格或者非结构网格对各种需要计算的复杂区域进行合适的网格划分^[15]。

FLUENT 软件的核心部分是求解模块，该模块的数学模型是由纳维斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程组与各种湍流模型为主体，再加上多相流模型、燃烧与

化学反应流模型、自由面模型以及非牛顿流体模型等等共同组成的。大多数附加的模型是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式等等。它是采用有限体积法离散方程，其计算精度和稳定性都是很好的^[16]。

FLUENT也具有强大的后处理功能，能够完成CFD计算的基本要求，包括速度矢量图、等值线图、等值面图、流动轨迹图，并且具有积分功能，可以求出力、力矩及其对应的力和力矩系数、流量等。对于用户关心的参数和计算的误差可以随时进行动态的跟踪显示。

FLUENT解算器有如下模拟能力^[17]:

(1)用非结构自适应网格模拟2D或者3D流场，它所使用的非结构网格主要有三角形/五边形、四边形/五边形，或者混合网格，其中混合网格有棱形和金字塔形；(2)不可压或可压流动；(3)定常状态或者过渡分析；(4)无粘，层流和湍流；(5)牛顿流或者非牛顿流；(6)对流热传导，包括自然对流和强迫对流；(7)耦合热传导和对流；(8)无粘，层流和湍流；(9)牛顿流或者非牛顿流；(10)对流热传导，包括自然对流和强迫对流；(11)耦合热传导和对流；(12)辐射热传导模型；(13)惯性(静止)坐标系非惯性(旋转)坐标系模型；(14)多重运动参考框架，包括滑动网格界面和rotor/stator interaction modeling的混合界面；(15)化学组分混合和反应，包括燃烧子模型和表面沉积反应模型；(16)热，质量，动量，湍流和化学组分的控制体源；(17)粒子，液滴和气泡的离散相的拉格朗日轨迹的计算，包括了和连续相的耦合；(18)多孔流动；(19)一维风扇/热交换模型；(20)多相流，包括气穴现象；(21)复杂外形的自由表面流动。

在大部分情况下，所测对象的变化趋势能够准确地预测出来，但是具体量的大小还是存在着一定的误差，这可依靠实验手段来进行修正。FLUENT的作用主要体现在缩短设计过程，减少实验室测定试验的数目，减少产品的开发成本，这也即是CFD的作用所在^[18]。

利用 FLUENT 软件的求解步骤为：需要以下几个基本的步骤来解决问题：

(1) 创建模型，划分网格；(2) 运行合适的解算器：2D(二维单精度)、3D(三维单精度)、2DDP(二维双精度)、3DDP(三维双精度)；(3) 输入网格；(4) 检查网格；(5) 选择解的格式；(6) 选择需要解的基本方程模型等；(7) 确定所需要的附加模型；(8) 指定材料物理性质；(9) 指定边界条件；(10) 调节解的控制参数；(11) 始化流场；(12) 计算解；(13)检查结果；(14) 保存结果；(15) 必要的话，细化网格，改变数值和物理模型。

1.3 本文工作

本文工作主要包括：

(1) 在对建筑小区生态环境问题做了简单介绍后，说明了非稳态污染物扩散研究的重要性，及在国内外的进展情况。同时，对 CFD 软件 FLUENT 的功能以及使用步骤做了简单的介绍；

(2) 介绍了大气环境模型，并对湍流模型以及各种模型的优劣做了介绍和对比；

(3) 论述了病毒动力学模型方程和应用，并将其引入模拟病毒源强；

(4) 提出了继发感染的计算方法，并编制了新的病毒源强的 udf 程序，有效地模拟了继发感染问题；

(5) 以二维水平方向的建筑群为数值模拟的基本对象，研究了以病毒生长曲线为源强的病毒源在建筑小区中的扩散情况，得出了重要研究结论，为设计有利于污染物扩散的小区结构提供了理论依据；

(6) 研究了流感病毒的生长曲线，首次研究了流感病毒在建筑小区内的扩散情况；

(7) 建立了三维模型，首次模拟了建筑小区内流感病毒的扩散情况，为优化建筑群设计，制定应急预案提供了理论指导，并与二维结果作了对比。

第二章 理论基础

2.1 大气环境质量模型

大气环境质量模型是大气污染物扩散研究的理论基础。比如其中大气的垂直分层、大气边界层的流动以及污染扩散特征都将影响污染物的扩散，也都将影响到计算模拟的结果。

2.1.1 大气边界层

大气边界层是指整个大气层最底下的一个薄层，在大气物理学上，把空气运动明显受到地表面摩擦(粘附)作用并且具有很大的风速垂直梯度的大气层称之为“大气边界层”，也称“摩擦边界层”，与流体力学中称固壁附近的边界层为“平板边界层”“机翼绕流边界层”等类似。大气边界层也常常被称之为“行星边界层”，因为它是处于旋转的地球上的。

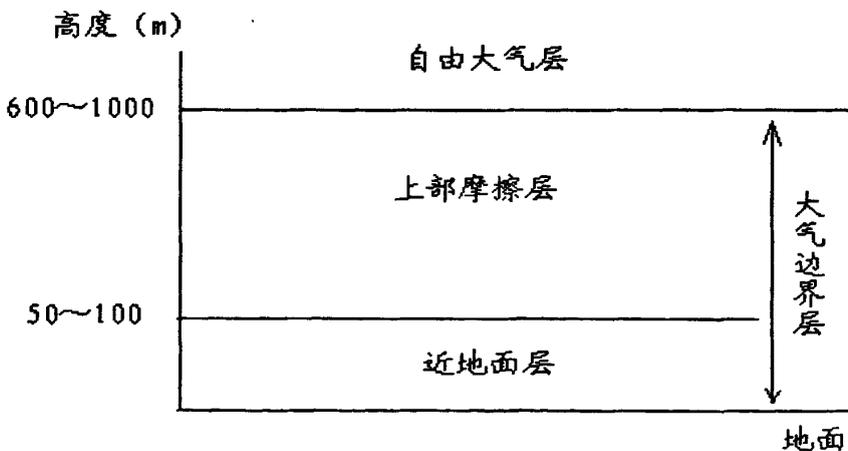


图 2-1 大气边界层示意图

大气边界层(以水平均匀下垫面为例)与一般流体力学绕流边界层(以平板为例)的另一差别在于上边界的不同,在流体力学中,边界层外部可以当作无粘流处理,并可用 Bernoulli 方程描述。如图 2-1 所示,50~100m 是近地面层,600~1000m 是上部摩擦层,这两者共同组成了大气边界层,在大气边界层以外的部分

就可以当作无粘流的自由大气层。

在边界层外缘处，边界层内的流场与外部流场有动量和质量的交换，因而流线抬升，边界层外缘廓线与水平坐标 x 有关（例如层流时是抛物线），边界层内的速度则与水平坐标 x 以及垂直坐标 z 均有关。然而，大气边界层的外部虽然也可作无粘流处理，但内部的风速分布只依赖于 z 坐标。

大气边界层中，摩擦力会随着高度的增加而减小，而当气压梯度力不随高度变化时，风速就会随着高度增加而增大。这种风速随高度变化的曲线称之为风速廓线。通过风速廓线可以由测量的地面风速情况推算出大气边界层中任意高度处的风速^[20]（如图 2-2）。

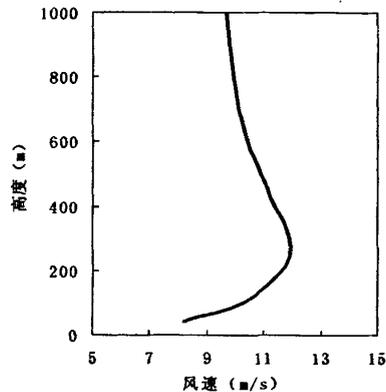


图 2-2 稳定边界层垂直速度分布

目前，气象学家认为用对数律表示近地层强风风速廓线比较理想，其表达式为

$$\bar{v}(z') = \frac{1}{k} \bar{v}^* \left(\frac{z'}{z_0 - d_0} \right) \quad (2-1)$$

其中 $\bar{v}(z')$ 是大气地层内 z' 高度处的平均风速， \bar{v}^* 是摩擦速度或流动剪切速度， k 是卡曼 (Karman) 常数， $k \approx 0.4$ ， d_0 是排挤厚度， z_0 是地面粗糙长度 (m)， z' 是有效高度 (m)， $z' = z - z_d$ ，其中 z 是离地高度， z_0 是零平均位移。

2.1.2 大气扩散的基本模型

大气扩散模型就其根本而言是一种数学模式，用于定量描述大气污染物从排放源到环境迁移转化全过程的一种手段或工具，其核心部分是描写污染物在大气

中的扩散和稀释作用。污染物在大气中所经历的其他过程,诸如烟气抬升,干湿沉积和化学转化过程等,则常以某种形式的过程参数、确定参数的方法或计算公式,以及子模型形式从属于大气扩散模型。应用分析模型具有地理空间特征的模型,特别是有明显的模拟过程的机理过程模型,比如潮汐、污染物扩散、流域模拟等模型。应用分析模型一般是现实世界某一方面的抽象或模拟,由同模拟对象有关的因素所构成,体现了这些因素之间的联系。大气环境质量模型就是属于应用模型中的一种。

大气环境质量模型研究的数学基础大多都来源于高斯扩散模型^[21]。在各种大气环境质量模型中,依据不同的地理条件、气象条件、污染源状况、预测的时间尺度与空间范围,又分成不同的污染物质的扩散预测模型。例如,按照污染物扩散的状态可以分为烟流模型、烟团模型以及箱式模型。按照数学推导方法的不同分为演绎法导出的物理模型以及归纳法得出的统计模型;按照污染源分布又可分为点源、线源以及面源扩散模型;根据不同的气象条件,有熏烟型、封闭型和微风下等扩散模式;根据不同的下垫面地理特点,有城市扩散模式、山区扩散模式和水域附近的扩散模式等;按照预测的时间尺度,有短期浓度预测模式和长期平均浓度计算模式。

大气环境质量模型中,污染物的三维扩散公式为^[22]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_y \frac{\partial C}{\partial y} - u_z \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma C \quad (2-2)$$

其中 $\partial C / \partial t$ 为污染物的浓度随时间的变化, D_x 、 D_y 、 D_z 分别为三个方向上的湍流扩散系数, u_x 、 u_y 、 u_z 为三个方向上的风速, γ 为污染物自身的衰减系数。因为对解析解的要求是非常严格的,通常很难满足这些要求,在一般的情况下是采用数值方法来求解。环境质量基本模型的数值方法主要是有限单元法和有限差分法。

在不考虑污染物自身的衰减的情况下,公式(2-2)可改写为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D_i + \frac{\mu_i}{Sc_i} \right) \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right] \quad (2-3)$$

其中 C_i 是污染物的浓度, D_i 是扩散系数, Sc_i 是湍动 Schmidt 数 ($Sc_i = 0.7$), 为了方便,将污染物的湍流扩散系数记为 $D = D_i + \mu_i / Sc_i$ 。这就是本文所使用的污染物扩散方程。

污染物在大气中的扩散主要取决于 3 个因素。其中风使污染物向下风向扩散,湍动使污染物向各方向均匀扩散,浓度梯度使污染物发生质量扩散。其中主要是风和湍流起主导作用。

风是污染物扩散的主要的动力。风使污染物发生推流迁移,风速越快,迁移

距离也就越远。如果大气层中没有湍流作用，那么排入大气中的污染物，向四周的扩散过程是非常缓慢的，因为此时只有较小的分子扩散起作用。在实际的大气中，正是由于湍流的存在，并且湍流扩散系数比分子扩散系数大 10^5-10^6 倍，导致污染物扩散非常迅速。所以，在实际的大气研究中，常忽略掉分子扩散作用。

2.1.3 钝体绕流介绍

当流体流过钝体物体时，会由于粘性作用，导致绕流流场中出现旋转、分离、再附以及尾迹区的非定常涡脱落等复杂现象，这便是钝体绕流现象。

随着雷诺数的增加，绕流情况会从附体流动，逐渐变成对称的脱体漩涡。而雷诺数再增大，背风面的漩涡会从对称变成非对称。若雷诺数达到某一范围时，在背风面上将会出现卡门涡街。卡门涡街是两两相隔、旋转方向相反的两列漩涡组成，且旋涡间距离不变，这间距只与物体的线尺度有关。

钝体绕流自发现后一直是人们研究的热门问题，其复杂的特性以及各种不同形状的钝体绕流的试验以及数值模拟都在不断的研究中。由于本文中的数值模拟的雷诺数很大，也出现了卡门涡街，这会导致病毒污染物扩散的波动性加强。

2.2 湍流流动及其数学模型

2.2.1 湍流介绍

流动状态的两种基本形式是层流和湍流，它们之间存在着临界的雷诺数。当层流流动的雷诺数超过相应的临界雷诺数时，便会诱发湍流。自然界中的大多数气流运动均属于湍流流动，它是一种高度复杂的三维非稳态、带旋转的不规则流体运动。而层流流动却可以精确地用质量、动量、能量和浓度的偏微分方程来描述。但是在大多数工程问题中流体的流动往往处于湍流状态。由于建筑物下垫面的复杂性，所以采用湍流模型对建筑小区周围的非稳态污染物扩散流场进行数值模拟比较合适。

当雷诺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，这种流动被称为层流。当雷诺数大于临界值时，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。

湍流^[23]的产生可能是由于所流过的固体壁面的摩擦作用，也可能由于具有不同速度的流体层之间的相互作用，这两种方式产生的湍流的性质有所不同，通常

前者称为固壁湍流(wall turbulence), 后者称为自由湍流(free turbulence)在湍流流动中, 粘性的作用一方面是把动能耗散为热能, 另一方面是使湍流在不同空间位置以及同一位置的各个方向上趋于均匀。通常把研究体系内处处具有相同结构的湍流称为均匀(homogeneous)湍流。将其统计平均性质不随方向而变的湍流称为各向同性(isotropic)湍流。在各向同性湍流中不存在平均剪应力, 也就没有平均流的梯度。只要流场中有均流梯度, 就一定伴随有剪应力, 湍流就一定是各向异性的, 这种湍流通常称为剪切湍流。固壁湍流和各向异性的自由湍流都属于这一类。若在整个流场中平均剪应力处处相等, 则这种湍流就是均匀湍流, 在湍流的描述中, 均匀和各向同性是两个不同的概念。

从物理结构上说, 可以把湍流看成各种不同尺寸的涡旋叠合而成的流动, 这些涡旋的大小及旋转轴的方向分布是随机的, 大尺度的涡旋主要由流动的边界条件所决定, 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所决定, 其尺寸可能只有流场尺度的千分之一的量级, 是引起高频脉动的原因。大尺度的涡旋破裂后形成小尺度的涡旋。较小尺度的涡旋破裂后形成更小尺度的涡旋。因而在充分发展的湍流区域内, 流体涡旋的尺寸可以在相当宽的范围连续地变化。大尺度的涡旋不断从主流获得能量, 通过涡旋间的相互作用, 能量逐渐向小尺度的涡旋传递, 最后由于流体粘性作用, 小尺度的涡旋逐渐消失, 机械能就转化为流体的热能。同时, 由于边界、扰动及速度梯度的作用, 新的涡旋又会不断的产生, 这就构成了湍流运动。由于湍流的复杂性, 目前还无法对其给出一个严格的定义。一般认为湍流有以下几个特征^[24]:

(1) 湍流的流体质点的运动类似于分子运动, 具有完全不规则的瞬息变化的运动特征。

(2) 湍流的运动参数虽是随机量, 但在一定程度上符合统计规律, 具有某种规律的平均特征。

(3) 湍流流场任意两个相邻空间点上的运动参数有某种程度的关联, 加速度关联, 速度与压强的关联等。边界条件不同的湍流具有不同的关联特征。

一般认为, 无论湍流运动多么复杂, 非稳态的 Navier-Stokes 方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。但是由于描述湍流的物理量相关并具有脉动性, 对脉动性的修正将产生高阶相关的偏微分方程, 并伴随新的未知量, 故湍流方程无法得到精确的解。

2.2.2 湍流的数学模型

本文研究的空气是粘性不可压缩流体, 其基本方程组为^[25]:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2-4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2-5)$$

其中, μ 是粘性系数, t 代表时间, u 是速度, x 代表方向, ρ 是流体密度, g_i 是重力加速度。该基本方程组是湍流模型的基础。

就目前的计算方法, 湍流方程组尚无精确解。所以数值模拟便成为一种主要的研究手段。但就目前来看, 湍流的数值模拟还远远未达到成熟的地步, 仍然是现今计算流体力学中困难最多而研究也最活跃的领域之一。目前, 湍流数值模拟方法一般可分为直接数值模拟方法和非直接数值模拟方法。

直接数值模拟 (DNS) 方法是指对瞬时湍流控制方程 (2-4) 和 (2-5) 两个方程直接求解, 即是利用三维非稳态的 Navier-Stokes 方程对湍流进行直接数值计算。由于高度复杂的湍流运动, 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。由于它没有对湍流流动情况作简化以及近似的处理, 所以它可以得到十分准确的计算结果, 但是由于湍流的湍动频率很高, 仅仅只能在极微小的空间以及时间步长下才可能分辨出湍流场中空间以及时间的详细特征。这对计算机的内存空间和计算速度都有非常高的要求, 就目前而言, 还无法在工程计算中实际操作。

非直接数值模拟方法是通过不直接计算湍流的湍动特征, 而是对湍流流动作一定程度的简化及近似处理。

其中大涡模拟 (LES) 方法也是现在研究的热点。它要求计算区域的尺寸足以大到湍流运动中出现的最大的涡旋, 又要要求网格的尺寸小到能够分辨出流场中的最小涡旋的运动情况, 故而该方法仍然要求很高的计算机能力。即使是放弃对全尺度范围上涡旋的运动模拟, 对比网络尺寸大的湍流运动直接计算, 对小尺度的涡建立湍流模型来模拟, 也需要很长的时间来进行模拟计算, 在工程应用上还有难度。

求解湍流问题广泛采用的另一种方法就是 Reynolds 平均法 (RANS)。由于它并不直接求解瞬时的 Navier-Stokes 方程, 而是解已经时均化了的 Reynolds

方程，从而其计算量远远小于 DNS 方法的计算量。这也是目前使用最为广泛的湍流数值模拟方法，在工程实际应用上也取得了很好的效果。

若按照雷诺应力的封闭方法，RANS 方法又可以分为雷诺应力模型和涡粘模型两种模型。

涡粘模型中不可压缩粘性流体所用的控制方程组如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2-6)$$

动量方程：

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) + \rho g_i \quad (2-7)$$

涡粘模型不直接处理雷诺应力项，而是把湍流雷诺应力表示成湍动粘度的函数，整个计算的关键在于确定这种湍动粘度。湍动粘度的提出来源于 Boussinesq 提出的涡粘假定，该假定建立了雷诺应力与平均速度梯度的关系，即：

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2-8)$$

其中， 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（turbulent kinetic energy）：

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

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。引入 Boussinesq 假定后，湍流流动计算的关键就在于如何确定 μ_t 。依据确定 μ_t 的微分方程数目的多少，湍流涡粘模型包括：零方程模型、一方程模型和两方程模型。

其中两方程模型在目前工程中使用的最为广泛，最基本的是 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

1、零方程模型

零方程模型是指不需要用偏微分方程而是用代数关系式把湍流粘性系数与时均值联系起来的模型。零方程模型只用湍流平均运动方程和连续方程组，并把方程组中的雷诺应力假设为平均物理量的某种代数函数，使方程组得以封闭。

零方程模型方案中最著名的是 Prandtl 提出的混合长度模型（mixing length model）。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。该理

论的优点是直观简单,对于如射流、混合层、扰动和边界层等有薄的剪切层的流动比较有效,但不能用于复杂流动,如带有分离及回流的流动,因此在实际工程中很少使用。

2、一方程模型

一方程模型是建立的一个湍动能 k 的输运方程来确定湍动粘性系数 μ_t , 并将 μ_t 表示成 k 的函数的模型, 这样可以弥补混合长度假定的部分局限性, 使湍流方程组封闭。湍动能 k 的输运方程可写为^[26]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) - \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_D \rho \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2-9)$$

方程中从左至右各项依次为瞬态项、对流项、扩散项、产生项、耗散项。湍流的一方程模型考虑了湍动能 k 的影响, 在理论上比零方程模型前进了一步, 但在工程实际中, 其长度尺度 l 的确定仍不易解决, 从而降低了一方程模型的精度, 限制了其推广应用。

3、 $k-\varepsilon$ 两方程模型

在工程湍流计算中, $k-\varepsilon$ 的两方程模型应用最广, 本文以 $k-\varepsilon$ 两方程模型为主。

$k-\varepsilon$ 两方程模型中的 k 指单位质量流量的湍流脉动动能, ε 指脉动动能的耗散率 ($\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$ ^[27]), 湍流粘性系数 μ_t 表示为:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2-10)$$

在引入一些假设后, 由 $N-S$ 方程推得 k 和 ε 方程^[28]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) - \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (2-11)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) - \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-12)$$

k 方程、 ε 方程与动量方程、连续方程一起构成了大气流动低速流动的基本控制方程。

(1) 标准 $k-\varepsilon$ 模型方程

标准 $k-\varepsilon$ 模型是由 Launder 和 Spalding 于 1972 年提出的, 该模型如下, 标准 $k-\varepsilon$ 模型中, k 和 ε 的输运方程为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2-13)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-14)$$

在此, G_k 是湍动能的产生项, σ_k 和 σ_ε 分别是 k 和 ε 对应的 Prandtl 数, $C_{\varepsilon 1}$ $C_{\varepsilon 2}$ 是经验常数, 取值可参考表 2-1。

标准 $k-\varepsilon$ 模型的适用性, 有如下几点需要引起注意:

1. 模型系数主要是根据一些特殊条件下的实验结果确定的, 在讨论不同的问题时, 这些值可能有出入。但总体来讲, 本文所给出的模型参数值是公认参考值。

2. 上述标准 $k-\varepsilon$ 模型, 是针对充分发展湍流建立的, 是一种针对高 Re 数的湍流计算模型。当 Re 数较低时, 例如, 在近壁区内的流动, 湍流发展并不充分, 湍流的脉动影响可能不如分子粘性的影响大, 在更贴近壁面的底层内, 流动可能处于层流状态。因此, 对雷诺数较低的流动使用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算, 就会出现问題。这时, 必须采用特殊的处理方式, 以解决近壁区内的流动及低雷诺数时流动计算问题。常用的解决方法有两种: 一种是采用壁面函数法, 另一种是采用低 Re 数的 $k-\varepsilon$ 模型。

3. 标准 $k-\varepsilon$ 模型比零方程模型和一方程模型有了很大改进, 在科学研究及工程实际中得到了最为广泛的检验和成功应用, 但在用于强旋流、弯曲壁面流动或弯曲流线流动时, 会产生一定的失真。原因是在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, 对于雷诺应力的各个分量, 假定粘度系数 μ_t 是相同的, 即假定 μ_t 是各向同性的标量。而在弯曲流线的情况下, 湍流是各向异性的, μ_t 应该是各向异性的张量。为了弥补标准 $k-\varepsilon$ 模型的缺陷, 许多研究者对标准 $k-\varepsilon$ 模型进行了修正, 下面介绍的 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型就是两种修正模型。

(2) RNG $k-\varepsilon$ 模型

RNG $k-\varepsilon$ 模型是由 Yakhot 及 Orzag 提出的。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控制方程中去除。RNG $k-\varepsilon$ 模型所得到的 k 方程和 ε 方程^[29], 与标准 $k-\varepsilon$ 模

型非常相似:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2-15)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho \left[C_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \right] \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2-16)$$

其中: μ_{eff} 是有效湍流黏度, $\eta = Sk / \varepsilon$, S 是形变张量, 系数 η_0 和 β 的值为 4.38 和 0.012, 其它参数取值可参考表 2-1。

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

1. 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;

2. 在 ε 方程中增加了一项, 反映了主流的时均应变率, 这样, RNG $k-\varepsilon$ 模型中产生项不仅与流动情况有关, 而且也是空间坐标的函数。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。

(3) Realizable $k-\varepsilon$ 模型

标准 $k-\varepsilon$ 模型对时均应变率特别大的情形, 有可能导致负的正应力。为使流动符合湍流的物理定律, 需要对正应力进行某种数学约束。为保证这种约束的实现, 文献^[30]认为湍动粘度计算式中系数 C_μ 不应是常数, 而应与应变率相联系。

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2-17)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2-18)$$

其中:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (2-19)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_1 U^* k / \varepsilon} \quad (2-20)$$

A_0 为常数, A_1 为曲率影响, U^* 为旋度影响。

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

1. 湍动粘度计算公式发生了变化, 引入了与旋转和曲率有关的内容。

2. ε 方程发生了很大变化, 方程中的产生项 (公式 2-15 右端第二项) 不再包含有 k 方程中的产生项 G_k 。

3. ε 方程中倒数第一项不具有任何奇异性, 即使 k 值很小或为零, 分母也不会为零。这与标准 $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 有很大区别。

Realizable $k-\varepsilon$ 模型已被有效地用于各种不同类型的流动模拟, 包括旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动, 以及带有分离的流动等。

表 2-1 湍流 $k-\varepsilon$ 模型中各项参数的取值

$k-\varepsilon$ turbulence model	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_{μ}	σ_k	σ_{ε}
Standard	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3
RNG	1.42	1.68	0.0845	Analytical formula	Analytical formula
Realizable	-	1.9	Analytical formula	1.0	1.2

4、其它湍流模型

前面介绍的各类湍流模型所采用的控制方程都是对流场中的一个点建立起来的, 可以统称为“单点模型”。为了掌握不同尺寸涡旋的统计特性, 考虑雷诺应力各个分量的不同发展, 常需要空间两点物理量关系的一些信息。由适用于单点的 N-S 方程出发可以导出空间两点间速度分量乘积的时均偏微分方程, 在此基础上建立起一套数值计算方法, 这类方法则称为“两点模型”。如雷诺应力输运方程模型 (RSM) 和代数应力模型 (ASM)。

(1) 雷诺应力输运方程模型(RSM)

为了反映 Reynolds 应力在各个不同方向之间的输运关系, 许多科学工作者放弃了 Boussinesq 涡粘性假设, 设法建立了关于 Reynolds 应力的微分输运关系式, 并由此得出 Reynolds 应力输运方程模型(RSM)。与两方程模型相比, 在理论上具有更好的通用性和精度。但这套模型要求解雷诺应力的所有分量所满足的微分方程, 同时还要求解 $k-\varepsilon$ 方程, 从而使需求解的模型方程数大大增加, 对计算机容量和计算费用的要求也大大增加。目前, RSM 的应用还不如 $k-\varepsilon$ 模型和 RSM 的简化形式 ASM 广泛。

(2) 代数应力模型(ASM)

RSM 计算工作量太大, 在实际应用中十分麻烦。为了减少偏微分方程数量, 在雷诺应力方程模型的基础上, 人们设法用雷诺应力的代数关系取代其微分方程, 在和 $k-\varepsilon$ 方程一起构成了 ASM 模型。

与标准 $k-\varepsilon$ 模型和 RSM 模型相比, ASM 的优点是在一定程度上综合了前者的经济性和后者的通用性。在计及体积力效应(浮力、流线弯曲、旋转等)时, ASM 的优点尤为突出, ASM 也是目前计算复杂湍流比较实用的模型。

5、大涡模拟 (LES)

大涡模拟是介于直接数值模拟 (DNS) 与 Reynolds 平均法 (RANS) 之间的一种湍流数值模拟方法。随着计算机的快速提高, 大涡模拟成为目前 CFD 领域的新热点^[31]。其基本思想是放弃对全尺度范围上涡的瞬时运动的模拟, 将比网格尺度大的湍流运动通过瞬时 Navier-Stokes 方程直接计算出来, 而小尺度涡对大尺度涡运动的影响则通过一定的模型在针对大尺度涡的瞬时 Navier-Stokes 方程中体现出来。要实现大涡模拟, 须完成两个重要的环节, 即建立一种数学滤波函数 (从湍流瞬时运动方程中将尺度比滤波函数的尺度小的涡滤掉, 从而分解出描写大涡流场的运动方程) 和建立亚格子尺度模型 (被滤掉的小涡对大涡运动的影响通过在大涡流场的运动方程中引入附加应力项来体现, 即亚格子尺度应力, 该模型为亚格子尺度模型 SGS)。按照湍流的涡旋学说, 湍流的脉动与混合主要是大尺度的涡造成的。大尺度的涡从主流中获得能量, 它们是高度的非各向同性, 而且随流动的情形而异。大尺度的涡通过相互作用把能量传递给小尺度的涡。小尺度涡的主要作用是耗散能量, 它们几乎是各向同性的, 而且不同流动中的小尺度涡有许多共性。大涡模拟就是基于这样的认识, 用非稳态的 Navier-Stokes 方程来直接模拟大尺度涡旋, 但不直接计算小尺度涡, 小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑。

2.3 Fluent 模拟的技术和理论

对建筑小区周围空气流场问题模拟的首要步骤是网络的生成, 即对空间中连续的计算区域进行划分, 剖分成许多个相连的子区域, 再通过相应的算法来进行相应的计算。

许多研究表明流动问题结果的精度程度以及计算的效率, 都主要取决于所生成的网格的质量及所采用的算法。网格质量的好坏是由网格的生成方法决定的。现在有多种网格生成办法, 如结构网格的贴体坐标法, 非结构网格的基于有限元方法的网格生成技术、基于 Delaunay 准则的一类网格剖分方法和波前法等等, 但是各种生成网格的方法在一定的条件下都有其优越性及不足之处。如前所述, 各种求解流场的算法也有其各自的适应范围。综合来看, 要建立一个成功高效的数值模拟, 只有当生成的网格和求解的算法达到良好的匹配时才能实现。

2.3.1 数值模拟的网格技术介绍

计算流体力学(CFD)发展的一个重要分支之一就是网格生成技术。而在 CFD 高度发展的美国,网格生成所需的人力时间占计算任务全部人力时间的 60%。因此将 CFD 技术进一步推向工程应用,必须首先完善网格生成技术。而对于复杂程度一般的计算区域边界,只需采用结构网格系统完全能够满足工程要求的精度。由于其算法相对比较简单,因而目前仍然被人们广泛采用。常用的三维结构网格生成方法大致可分为代数生成法、椭圆微分方程生成法和双曲微分方程生成法等三类。

1、结构性网格

严格意义上讲,结构化网格是指网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元。其节点排列有序,即当给出了一个节点的编号后,立即可以得出其相邻节点的编号。结构网格是一种较为传统的网格形式,是由于网格的自身利用了几何体的规则形状,故而要求几何体要有一定的规则性。

结构化网格有很多优点,比如易实现区域的边界拟合,适于流体和表面应力集中等方面的计算,网格生成的速度快,网格生成的质量好,数据结构比较简单、对曲面或空间的拟合大多数采用的是参数化或样条插值的方法得到,而且区域光滑,与实际的模型更容易接近等等。

结构性网格的缺点就是其适用的范围相对比较窄。由于计算模拟的几何体越来越不规则了,也由于随着近几年的计算机技术和数值方法的快速发展,人们对计算求解区域的复杂性的要求也越来越高,在这种情况下,结构化网格就显得力不从心了,这就出现了非结构网格。

2、非结构性网格

非结构网格技术在上世纪 80 年代末 90 年代初得到迅速发展。其基本思想是:由于四面体结构是三维空间最简单的形状,任何空间区域都可以被四面体单元所填满,也就是任何空间区域都可以被以四面体为单元的网格所划分。很显然,非结构网格方法舍去了网格节点的结构性限制,节点以及单元的分布是任意分布的,这样能够较好地处理较为复杂的边界。

非结构网格方法在其生成过程中都采用一定准则进行优化判定,因而能生成高质量的网格,且很容易控制网格的大小和节点的疏密度。一旦在边界上指定网格分布,在两个边界之间即可自动生成网格,因此非结构网格系统在近年来受到了很大的重视,有了较大的发展,针对二维粘流场构造出适应于非结构网格的有限体积时间推进格式,利用点自动生成的 Delaunay 三角化方法构造非结构网格,同时处理成自适应网格形式,能够计算带移动边界的瞬时流动问题等。

非结构化网格相对于结构性网格来说最大的优点是有效网格的生成比结构网格容易,能够满足大多数的计算区域的网格划分。非结构网格的缺点是,所需计算内存较大,计算效率较低,网格的生成速度慢,且网格数远多于结构网格,从而影响计算速度。

而结构/非结构混合网格系统则兼顾了二者的优点,对于几何形状复杂的三维问题可以由近边界处的非结构网格和远离边界的结构网格构成,具有灵活模拟复杂边界和计算效率高的特点。

2.3.2 数值模拟方法的选取

FLUENT 提供的算法有三种:可以选择 SIMPLE、SIMPLEC 和 PISO。其中,PISO 算法主要是用于瞬态问题的模拟,尤其是当计算中的时间步长很大的情况。如果在网格高度变形的情况下,也是可以选择 PISO 用于稳态计算的。但值得注意的是,对于 LES 模拟来说,因为 LES 需要很小的时间步长,因此,PISO 算法并不适合。

SIMPLE 是 FLUENT 默认的算法方式,但大多数情况下选择 SIMPLEC 可能更合适一些,这主要是由于 SIMPLEC 的欠松弛特性可以加速收敛。该欠松弛因子一般取为 1.0,但有时可能造成计算的不稳定,减小欠松弛因子或者改用 SIMPLE 算法就可以解决问题。而本文选用的是 SIMPLEC 算法。

2.3.3 边界条件的选择

进流边界取的是大气边界层风速剖面公式 (velocity-inlet),即给出入口边界的速度,这一边界条件给定入口边界上的速度以及其他相关标量值,该边界条件适用于不可压速流动问题,对可压缩问题不适用,否则该入口边界条件会使入口处的总温或总压有一定的波动。

出流边界采用完全发展出流边界条件即自由出流边界条件 (outflow):用于模拟在求解前流速和压力未知的出口边界,在该边界上,用户不需要定义任何内容(除非模拟辐射传热、粒子的离散相及多口出流),其出流条件是由 FLUENT 计算出来的。该边界条件适用于出口处的流动是完全发展的情况。所谓完全发展,意味着出流面上的流动情况是由区域内部外推得到的,并且对上游流动没有影响。出流边界条件不能用于可压流动,也不能与压力进口边界条件一起使用。

两侧及上边界,用对称边界条件 (symmetry):用于物理外形以及所期望的流动的解具有镜像对称特征的情况,也可用来描述粘性流动中的零滑移壁面。在对称轴或对称平面上,既无质量的交换,也无热量等其他物理量的交换,因此垂

直于对称轴或者对称平面的速度分量为零。在对称边界上,不需要定义任何边界条件,但必须定义对称边界的位置。

建筑物边界以及地面是用无滑移的壁面条件(wall),在粘性流动中,壁面处默认为无滑移的边界条件。

2.3.4 网格的划分及网格质量的优化

1、网格划分应注意的问题

(1) 在构建网络时,尽量减少网格的生成时间,但同时也要保证网格的质量要求。

(2) 网格形式的选择:一般对于同一个几何体而言,三角形/四面体网格元素通常要比四边形/六面体的数目要少,但是后者却能允许比较大的纵横比,因此对于狭长形的几何体选择该种网格类型。

(3) 数字发散:引起发散的主要原因是由于系统格式截断误差所致。如果实际流场只有很小的发散,这时的数字发散就显得十分重要了。但是对于 FLUENT 来说,二次离散有助于减少发散,另外,优化网格也是降低发散的有效途径之一。

2、网格质量的优化

网格的分布特性,比如网格的高宽比、正交性以及网格的均匀性(光顺性)等等特性,对数值模拟的结果均有很大的影响。在二维结构化网格中,一般认为计算单元的长宽比应接近于 1。前人^[32]曾用算例研究了相邻两个单元之间尺度变化对计算结果误差的影响,他认为只要这一尺度保持在 1.5~2.0 以内,便不会对计算结果的误差产生重大的影响。

Roache 等人还提出了对于不同疏密程度网格计算结果准确性的一种评估方法,即所谓的网格收敛指标(GCI)法。

网格的加密方法,也是网格优化的方法之一。在实际问题中,单元高宽比的具体值与所计算的具体问题密切相关。在初始设定的网格中完成一次计算后,如果高宽比不合适的话(即得不到精确解时),可以再加密网格。网格的加密方法很多,在 CFD 计算软件中,可以采用 GAMBIT 中的网格加密工具(GAMBIT 中网格加密方法工具有:Boundary layer 网格辅助工具、size function 网格工具、Grid adaption 网格工具等等),也可用 FLUENT 中的网格梯度自适应方法边计算边修改加密。本文采用的就是 FLUENT 中的梯度自适应梯度加密方法。

3、网格数目与计算时间的关系

计算机的 CPU 和网格数、离散格式阶数以及湍流模型和算法都有十分密切的关系。一般来说,大概十万个网格单元对应消耗 100M 的内存。而在内存和 CPU 速度二者间,计算的速度与内存的关系更大。这里有一个参考的数据可以说明问题:62 万网格, RNG $k-\varepsilon$ 模型,一阶精度,计算机的配置是 p4 1.7G, 512M DDR 内存,计算 100 步大约需要 2 个小时的时间。

2.3.5 用户自定义函数 (UDF) 的使用

用户自定义函数(UDF)是用户自编的程序,它可以被动态的连接到 FLUENT 求解器上来提高求解器性能。用户自定义函数用 C 语言编写。UDFs 中可使用标准 C 语言的库函数,使用 DEFINE 宏定义,也可使用预定义宏(Fluent Inc.)提供,通过这些预定义宏可以获得 FLUENT 求解器得到的数据。

UDFs 使用时可以被当作解释函数或编译函数解释函数。在运行时读入并解释。而编译 UDFs 则在编译时被嵌入共享库中并与 Fluent 连接。解释 UDFs 用起来简单,但是有源代码和速度方面的限制不足。编译 UDFs 执行起来较快也没有源代码限制,但设置和使用较为麻烦。

通过在 C 程序中将要表达的各种方程或式子用 UDF 特定的形式表达出来,然后在 FLUENT 中导入 c 程序,这样就能使用 FLUENT 内部程序无法表达的方程或表达式了。自定义函数(UDF)大大扩大了 FLUENT 的功能,使其能够解决很多更加复杂的问题。

本文用到的 DEFINE 宏包括以下几个:

(1) DEFINE_PROFILE: 当表示空间或者时间变化的各种边界条件的方程式较为复杂时,可以使用 DEFINE_PROFILE 来自定义,以满足 FLUENT 内部程序无法处理的边界条件方程式。如本文中速度场的分布情况。

(2) DEFINE_SOURCE: 当 FLUENT 内部程序无法满足表示不同类型的源强的式子时,可以使用 DEFINE_SOURCE 来自定义。如本文中非稳态污染物的生长曲线作为源强。

(3) DEFINE_DIFFUSIVITY: 使用 DEFINE_DIFFUSIVITY 来自定义流体的扩散率。如本文中空气的扩散率。

(4) DEFINE_TURBULENT_VISCOSITY: 这是用来自定义流体中湍流粘度的。如本文中空气中的湍流粘度系数。

第三章 非稳态污染物对建筑小区影响的二维模拟

非稳态污染物在建筑小区中的扩散,其复杂性有很多,既包括建筑小区内各种不同的建筑格局、建筑物的尺寸形状,也包括非稳态污染物自身的生长变化,甚至还会在建筑小区内产生新的污染源,这些都对计算模拟提出了很高的要求。这些方面的问题都需要一一作出解决。

大多数的微生物性非稳态污染在随着媒介传播的过程中,一旦其到达一个极易适合其生长的环境区域,便会在这个新的区域内繁衍生殖,一段时间后,在这个区域形成一个新的微生物污染源。所以只要各种环境条件均达到要求,一个空间区域比如一个建筑小区中就可以产生多个微生物污染源,其数目是可以无限增大的。而这些新产生的微生物污染源将会按照最初的微生物污染源的规律开始生长,并且各种污染源的浓度是叠加的,即新产生的污染源将会与其他所有存在的污染源共同作用,一起传播并影响整个环境区域。

本章是对非稳态污染物在建筑小区内扩散的二维数值模拟,得出大多数的非稳态污染物的共同规律,为下一步的流感病毒的模拟以及对三维的模拟作出准备。

3.1 非稳态污染物模型的建立

从生态学的观点来看,微生物或寄生虫在脊椎动物宿主体内发生感染的过程,其本质上是病原体种群在宿主这个生态环境中生存、进化与适应的斗争过程。病原体在其生境(habitat)一宿主组织中增殖,通常会受到宿主理化屏障或捕食者和竞争者的限制和约束,比如皮肤粘膜机械屏障、补体、粘膜表面分泌型抗体、吞噬细胞、T细胞、其他微生物的存在等等^[33]。而同时入侵的病原体通常会有一些性状极易适合于侵袭及在宿主体内生存繁殖(比如粘附、定植、侵袭能力、抗吞噬能力、毒力因子等等)。

大多数的微生物在空气中的存在是以气溶胶的方式为主^[34]。正是由于微生物气溶胶具有非稳态的性质,对实际的实验研究造成了较大的困难,为此本文将利用数学模型对微生物气溶胶在空气中的扩散规律进行模拟。该研究将考虑到微生物的生长繁殖过程,将采用群体病毒动力学模型来表示微生物生长的变化量,并做为非稳态模拟中的污染源。

微生物气溶胶是指分散相中含有微生物的气溶胶,有时又称为生物气溶胶

(biological aerosol)。微生物悬浮于空气中可形成各种各样的微生物气溶胶 (microbiological aerosol), 大约有 50 多万种。以微生物的种类又可分为细菌气溶胶 (bacterial aerosol)、真菌气溶胶 (fungus aerosol)、病毒气溶胶 (viral aerosol) 等等。气溶胶的粒子尺寸分布相当广泛, 从 0.001-100 μm 不等。由于微生物是一个群体概念, 所以形成的气溶胶粒谱范围也很宽, 大约从 0.002 到 30 μm 不等, 而其中具有较大意义的生物气溶胶粒子径为 0.1-20.0 μm 。

正是由于微生物气溶胶繁多的种类, 广泛的分布以及比较大变异范围的浓度及粒子径等等特性, 因此它与人类社会关系十分密切, 也极易造成环境污染及某些传染病和疾病的暴发流行。

在建筑小区中的微生物扩散, 也是以微生物气溶胶的形式传播的, 而且正是由于其以气溶胶的形式传播, 才可以在风的作用下快速的传播, 并影响大范围的环境。我们也是通过对气溶胶的数目来计算环境中的病毒数目^[35]。

3.1.1 微生物生长模型

现阶段关于微生物生长变化的曲线的模型研究有很多, 比如有:

1、Malthus 模型: 假设微生物数目是时间的函数, 并且关于时间是连续光滑的。

$$N(t) = e^{at} \quad (3-1)$$

2、Logistic 模型: 在一个有限资源的环境内病毒数目是不可能无限增长的(如图 3-1)。

$$N(t) = \frac{k}{(1 + be^{-at})} \quad (3-2)$$

另外, 还有 Verhulst 灰度模型, 用来描述非单调的摆动发展序列和饱和的 S 行序列的状态过程, 但是模拟出来的曲线虽然形状上符合 S 形曲线, 但由于物理意义的限制, 并不适合来描述生物的生长^[36]。

对于通过空气入侵宿主体内的微生物来说, 一方面它是在感染着宿主, 而同时另一方面微生物群落也是在宿主体内的生态环境中生存繁衍、进化与适应的斗争着。由于微生物病原体在宿主中的生长通常会遭受到宿主理化屏障或者捕食者和竞争者的限制和约束, 既不可能像 Malthus 模型一样无限制的增长, 也不会像 Logistic 模型一样保持平衡, 而会伴随着死亡过程慢慢减少。这就要求更加全面的微生物的生长模型^[37]。

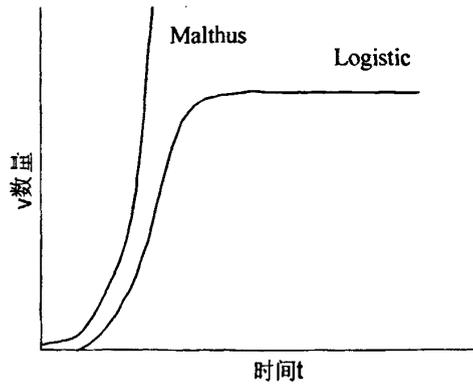


图 3-1 Malthus 模型和 Logistic 模型趋势

现阶段宿主体内的群体动力学研究日益受到重视,其研究主要是集中于持续性的病毒感染。广泛使用的这种病毒感染群体动力学模型^[38] (如图 3-2) 为

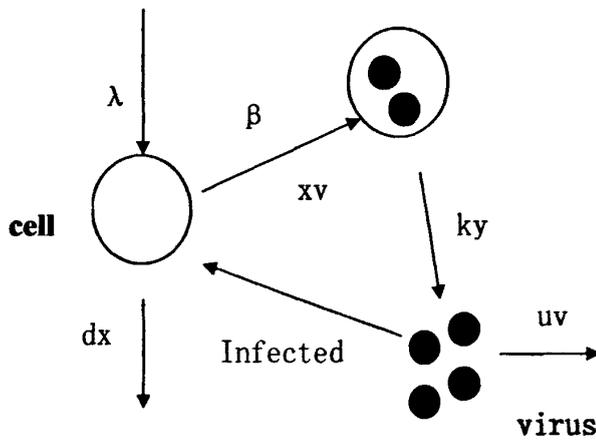


图 3-2 病毒感染群体动力学模型示意图

$$\frac{dx}{dt} = \lambda - ex - \beta vx \quad (3-3)$$

$$\frac{dy}{dt} = \beta vx - ay \quad (3-4)$$

$$\frac{dv}{dt} = ky - uv \quad (3-5)$$

其中, x , y , v 分别为宿主体内未感染的细胞数、已被感染的细胞数以及游离的自由病毒数; λ , e , β , a , k , u 均为正的常参数, λ 表示未感染细胞的自然增长率, e 表示未感染细胞的密度制约系数, 即一个区域中细胞数目在饱和的情况下会有所减少, β 表示在病毒复制过程中游离的自由病毒 v 和未感染细胞 x 的相互作用系数; a 为感染细胞的死亡率; u 为游离的自由病毒的死亡率; $k = aL$, L 表示一个死亡的细胞向环境中平均排放的病毒总数。随着时间的变化, 可以得出病毒数目随着时间变化的坐标图, 如图 (3-3) 所示。这图表示病毒生长周期为生长前期、快速生长期、衰退期以及平衡期。曲线到最后进入平衡期, 或趋于平衡, 或在平衡线附近波动, 而文本仅仅只是要研究微生物的非稳态变化过程, 所以将平衡点作为病毒生长的终点位置。

从文献中可以看出, 病毒感染群体动力学模型得出的病毒生长曲线能很好的符合微生物生命周期 (生长前期阶段; 快速生长阶段; 衰退阶段; 平衡阶段) 过程, 而有关研究染病生物体内病毒数目变化的生物曲线的大致趋势也与之符合。所以, 可以认为选择这种模型来模拟一般性的病毒污染物的生长过程是可行的。

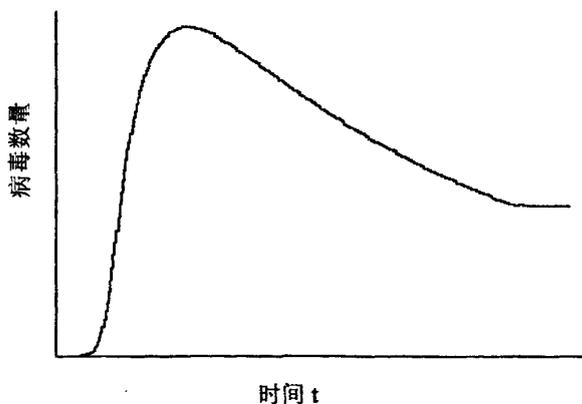


图 3-3 病毒群体动力学模型的生长曲线示意图

3.1.2 非稳态污染物源强的确定

根据前人的工作,首先,选择了上述的病毒感染群体动力学模型,并且确定了一组动力学方程组中各参数值(如表 3-1),再通过 matlab 中标准 Runge-Kutta 方法进行迭代计算,从而得出一般性的病毒污染源的生成变化曲线。步长取为 $h=1s$,初值 $x_0=20000$, $y_0=0$, $v_0=5$,当迭代 6000 步后,曲线达到平衡点 6000 附近,得到一般性的病毒污染物的生成变化曲线(如图 3-4)。

从图中可以看出,病毒生长前期(500s),又叫做隐藏期,病毒生长的十分缓慢,这与前期的游离的自由病毒较少有关,常常有一个时间延迟 t ,这与死亡的细胞释放病毒的速度有关。500s~2000s 是快速生长期,又称为对数生长期,生长速度呈对数形式快速生长,病毒数目迅速达到了 $1.2e^5$ 。接下来的 2000s~6000s 是病毒生长的衰退期,几乎呈直线形式的衰减,直到衰减到 6000 左右,之后进入平衡期,已不在模拟计算的范围内。

由病毒群体动力学模型计算得到的病毒成长变化曲线将会作为以下模拟计算的非稳态污染源的源强。如果当一个新的区域内产生新的污染源时,我们假设它的一切生长环境均与最初的环境相同或相似,其病毒生长规律也完全符合最初的病毒源的病毒生长曲线变化。这就保证了所有的病毒源都有相同的病毒生长曲线,也大大简化了计算模拟的难度。

这个病毒生长曲线只是作为众多非稳态污染物中的有代表性的一种曲线,但是它的曲线形式却可以代表大多数的非稳态污染物的生长情况。这是因为其生长曲线既有缓慢的初期(隐藏期),快速的成长期(对数生长期),中期短暂的稳定期,以及漫长的衰退期,这与大多数生物的生长发展规律相符,当然也包括病毒微生物在内。

不同的病毒在不同的环境中都会有不同的生长速度,其生长曲线也会千变万化,绝对不会是单调的几种曲线。但是它们都应该有相似的生长规律,相似的生长曲线,也会有相似的扩散规律,相似的病毒扩散图像,我们要研究的就是它们之间共同或相似的规律,举一反三,得出一些有用的信息,对各种病毒的预防工作以及预警模型的建立提供理论依据。

表 3-1 病毒动力学方程组各参数的取值

参数	λ	β	e	k	a	u
参数值	1000	0.001	0.1	50	0.5	5

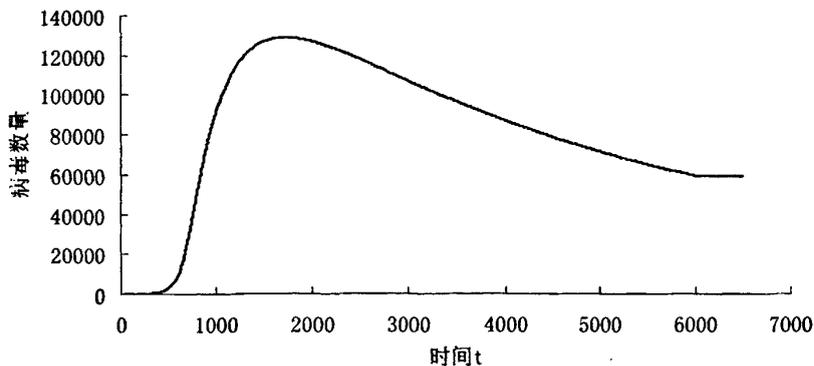


图 3-4 非稳态污染源变化曲线

3.2 非稳态污染物对建筑小区影响模拟

3.2.1 参数设定

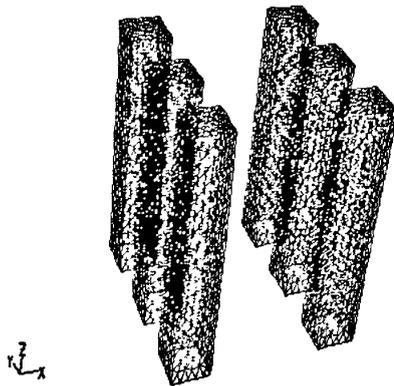


图 3-5 三维建筑模型示意图

在现实生活中的单个建筑或者建筑群，都是三维的空间结构，如图 3-5 所示。在大气边界层内，空气在各个建筑物之间以符合流体运动规律的方式进行流动，而各种污染物包括非稳态病毒污染物会随着空气的流动到达建筑物的各个角落，并进入各家各户，从而对居住在建筑小区的居民造成污染。对三维的计算模拟能够较为真实的反映实际的空气的流动以及污染物在小区的扩散情况，这也是三维优于二维的地方。

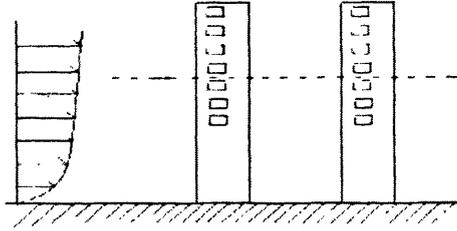


图 3-6 虚线为所取的水平方向的计算面

在非稳态计算时，先计算二维模型，再计算三维模型的计算方法有很明显的优势。因为在开始进行多种情况的摸索时，尤其是步长很小时，计算量相当的大且十分耗时。由于在二维情况下，便可看到污染物扩散的趋势，所以本文先用二维模型对非稳态微生物污染物在空气中的扩散进行模拟，然后再计算三维模型，并且对二者再进行对比。

假设地面上的粗糙度均匀、建筑小区前面有足够的空旷地带并且还满足稳定大气边界层条件时，可以取一水平面（如图 3-6）作为研究对象。该水平面除在建筑物及其附近位置发生变化外，其余地方的风速一致， k 、 ϵ 也一致。

本文中非稳态模拟选用的模型如图 3-7 所示，是前三后二的建筑小区，每栋建筑物的底部都是边长为 h 的正方形，分别为 A、B、C、D、E 五栋建筑。而同排建筑物的间距为 h ，前后排建筑物的间距为 $3h$ ，其中 $h=15\text{m}$ 。假设其周围没有其他任何建筑物，风速是均匀平稳的。同时也假设建筑物平面代表的是无限高的建筑物。

假设各个墙面中央都有一扇窗户，是室内与室外空气交换的窗口。同时假设建筑群中的墙面 a 的中央区域是非稳态微生物的原始污染源，也就是说病毒将由 a 墙面开始传播。并且假设当小区内某个建筑物的某个墙面的单位病毒数目达到一定的规模条件时，便会在该墙面上会产生一个新的病毒微生物污染源，并假设其病毒生长规律与原始的污染源完全相同。这个规模条件就是某个墙面上的单位病毒数要达到 4000 以上，这也就是说当某个墙面的窗口中病毒数目累计到 4000 时，该墙面的窗口位置便会产生新的病毒污染源。各个可能成为病毒源的墙面包括墙面 a~j 共 10 个墙面。设总的计算时间为 T ($T=6000\text{s}$)，病毒微生物的源强如上（图 3-4）。

根据前人的经验，该计算模拟选择使用离散求解（segregated solver）中的隐

形求解 (implicit)、非稳态计算(unsteady)。标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 以及 Realizable $k-\varepsilon$ 都是现阶段常用的模拟计算模型, 各有优劣, 根据前人做的对比, RNG $k-\varepsilon$ 是模拟效果、稳定性最好的, 也是其中最符合建筑小区中空气流动的模型。所以本文也同样选用了 RNG $k-\varepsilon$ 粘度模型。

由于在建筑小区前方没有任何其他的建筑物, 所以进流边界取均匀流速 $u_i = 5\text{m/s}$ 。 k 和 ε 的值也对计算结果有直接影响。通过计算, k 取 0.684653, ε 取 0.57。出流边界是采用的完全发展出流边界条件。两侧边界, 用对称边界条件。建筑物边界是用无滑移的壁面条件。计算域定为 $100h \times 30h$ 。

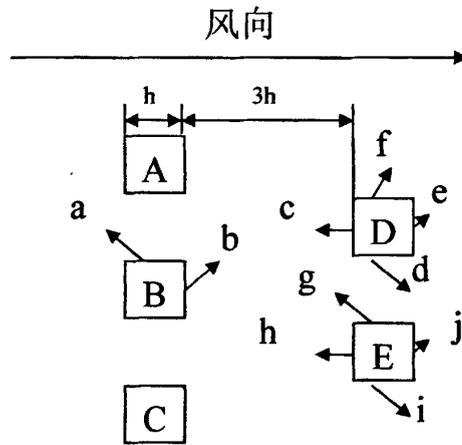


图 3-7 二维非稳态污染源扩散模型

3.2.2 结果与讨论

计算的结果包括速度矢量图、病毒污染物随时间变化的扩散图像以及各墙面上病毒数的变化图。

建筑小区内的速度矢量图如图 3-8 所示。从图中可以看出：风场是对称的，建筑物前方的风场是均匀的，而在建筑物 B 的迎风面两边出现高速风区，而在建筑物 B 的下风处形成一个低风速的顺时针涡旋。这个涡旋也同时影响到建筑物 D 以及 E，使得它们的上风面并无太大的气体流动。在建筑物 D 与 E 之间也有一个较小的涡旋，是逆时针方向的。而在建筑物 A 与 C 后各形成了大的涡旋，彼此对称。

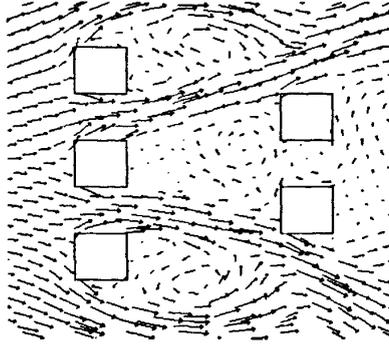


图 3-8 速度矢量图

一、病毒性污染物在建筑小区中随时间变化的扩散如图(3-9)所示。可以看出:

(1) 在病毒污染物扩散的初期(1000s内),还没有产生新的污染源,仅仅只有一个原始的病毒污染源,并且扩散得较为缓慢。但随着时间的推移,到了2000s时基本上呈对数形式快速扩散,浓度也迅速升高,污染物迅速向下风处蔓延,污染面积扩大。这基本上符合病毒的生长变化规律,可以认为这是由于单个病毒污染源作用的结果。

(2) 在墙面c处病毒数目首先达到了产生病毒源的临界值4000,在此处形成一个新的病毒污染源。随着病毒扩散时间的推移以及环境中污染物浓度的升高,先后在下风处的墙面b、d、e、f、g、h、i、j处均形成了新的病毒污染源。这些污染源共同作用,其对环境造成的污染程度远远大于仅仅一个污染源所能达到的程度。

(3) 墙面b、e、j处于各个建筑物的背风区域。从速度矢量图中也能看出在这些区域中,没有太大的空气流动。随着扩散的时间推移,该区域中的病毒数迅速累计,而又无法扩散出去,成为整个小区中浓度最高的区域,自然也就是整个小区中受污染最重,也是最让人值得注意的区域。在2500s时,墙面b的病毒数达到了969167,是当时浓度最高的墙面;5000s时,墙面e的病毒数达到了646428,是5000s时浓度最高的墙面。这说明在背风区域一旦产生了新的病毒源,其他区域的病毒会扩散到这里,但是却不能扩散出去,病毒极易累计。

(4) 墙面a、f、i处于高速风道中,从图中可以看到在墙面f、i处几乎没有病毒污染物的累计,虽然能够在该区域产生新的病毒源,但是新生长出来的病毒还没来得及聚集便迅速的在风力作用下向下风处传播,不易形成高浓度的病毒污染区。

(5) 墙面d、g处于下风向建筑物D、E的间隙中,由于此处形成了一个较

低速的逆时针涡旋，病毒污染物在狭小的空间中低速扩散，仅仅有少量的污染物能够扩散出去。也正是由于逆时针的涡旋作用，使得墙面 g 的病毒向墙面 d 扩散，这样墙面 g 的病毒污染程度便高于墙面 d。

(6) 从速度矢量图中可以清楚的看到，正是由于前三后二的建筑格局，在小区内形成了一个顺时针的大涡旋，并且风速很小，恰好将病毒滞留在这个小区内，无法扩散出去，致使墙面 d、g、h 的病毒浓度普遍偏高。

(7) 如果下风处还有其他建筑物或者人群聚集处，能够在空气中存活较长时间的大量病毒污染物势必在下风处产生新的污染源，对它的控制势必更加艰难。

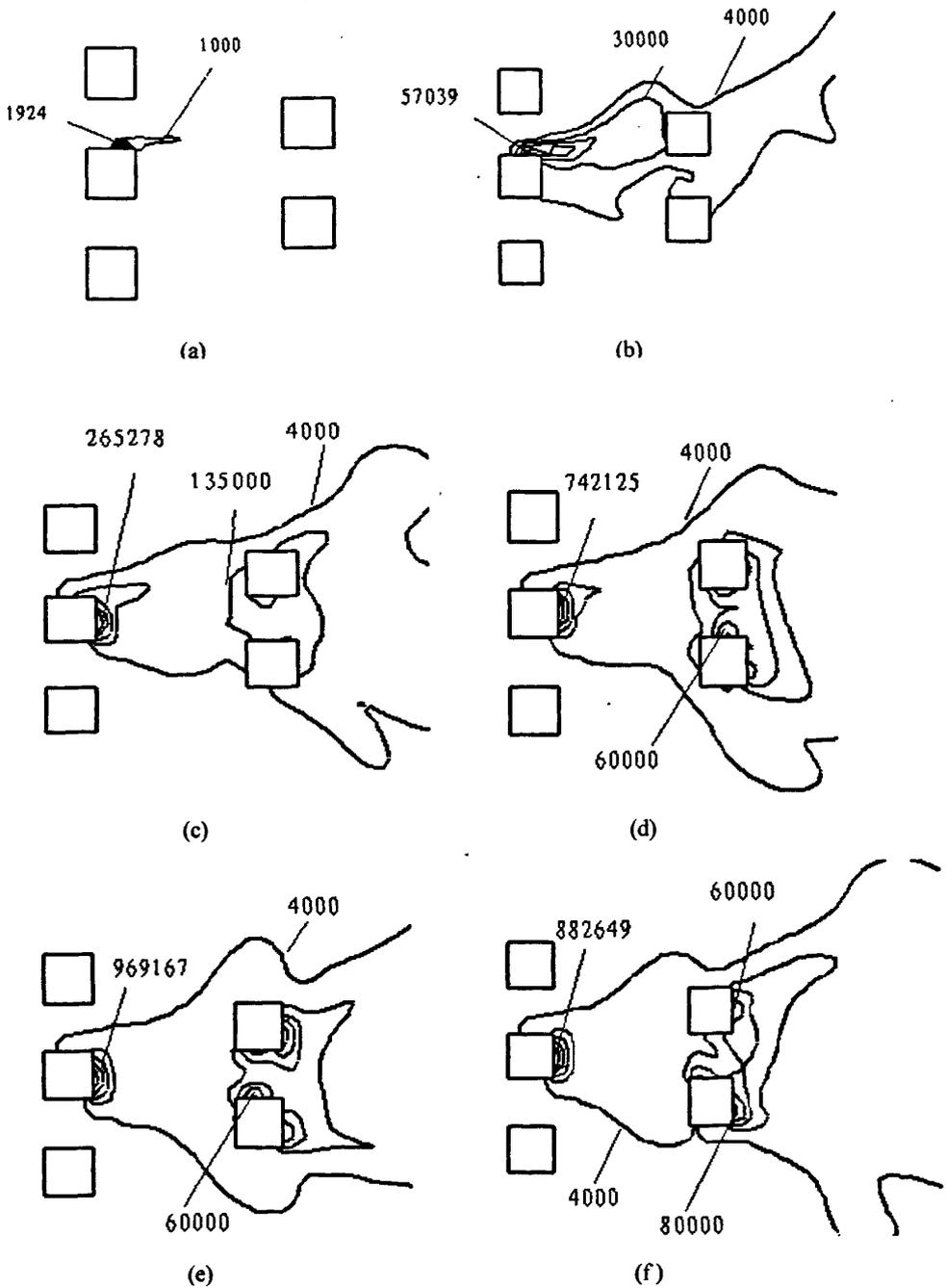


图 3-9 微生物污染物浓度分布随时间变化图

(a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
(g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

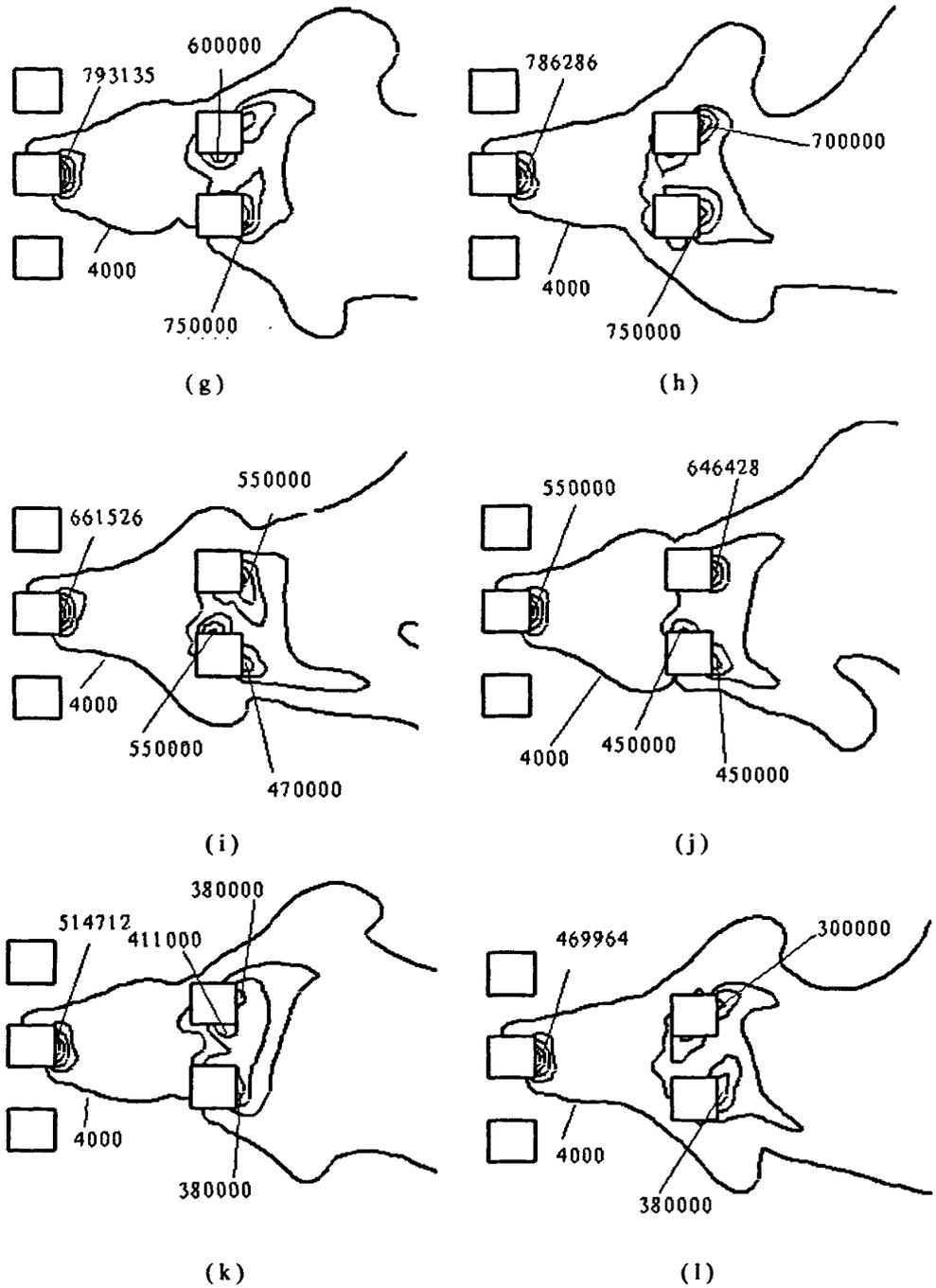


图 3-9 微生物污染物浓度分布随时间变化图 (续)
(a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
(g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

二、建筑小区内各墙面上污染物浓度随时间的变化如图 3-10，可以看出：

(1) 各墙面污染物浓度图相比于污染物浓度分布图，更加准确的反映了在不同时间污染物浓度的变化情况，以及能清楚的看到各个墙面的浓度最大值及其发生时间。

(2) 墙面 a 是最初的原始病毒污染区域，且处在上风区，在墙面 a 最大污染出现在 1600s，约为 $9e^4$ ，其病毒变化曲线基本上符合病毒生长变化曲线。故墙面 a 主要在病毒扩散前期受到病毒污染影响，到了后期已处于病毒生长的衰退期，病毒微生物对墙面 a 的影响也较其他墙面要小一些。

(3) 墙面 b 处于建筑物 B 的背风区，在 2200s 时到达了最大值，约为 $1.2e^6$ ，是各个墙面中浓度最高的一个。这是由于该区域很早就生成了新的污染源，并且离原始的污染源最近，处于背风区，自然难于扩散出去。一旦自身成为新的污染源后，其病毒污染基本上达到稳定，且浓度明显较高，是主要的病毒污染区域。

(4) 墙面 e、j 也是处于建筑物的背风区，在 3000s 时达到了最大值，约为 $4.5e^5$ 。在计算前期都没有病毒污染，一旦自身成为新的污染源后，病毒污染浓度迅速上升，且浓度明显较高，也是主要的病毒污染区域。

(5) 墙面 f 处于高速风道，在 2000s 时达到了最大值 $3e^5$ 。在扩散的后期有反弹趋势，这是由于自身以及其他新的污染源的产生对该区域的共同作用的结果。

(6) 墙面 d、g 都处于两个建筑的间隙，但是墙面 d 的最大值 $4e^5$ 要大于墙面 g 的最大值 $3e^5$ ，这也正是由于在建筑物 D 与 E 之间的逆时针的漩涡对污染物扩散作用的结果。如果这个间隙能够再大一些，这个涡旋的半径也会增大，气流速度会减小，墙面 d 与 g 的污染物的浓度差距也会缩小。

(7) 由于已经产生了多个新的病毒污染源，如果在病毒扩散的中后期仅仅只是将最初的病毒源清除或隔离，对小区内的病毒扩散并无太大的影响。所以发现病毒扩散以后，必须对所有可能产生新的病毒污染源的区域加以检查并隔离污染源。任何被遗漏的污染源都可能在适宜的生长的环境下生长，扩散，产生新的污染源。

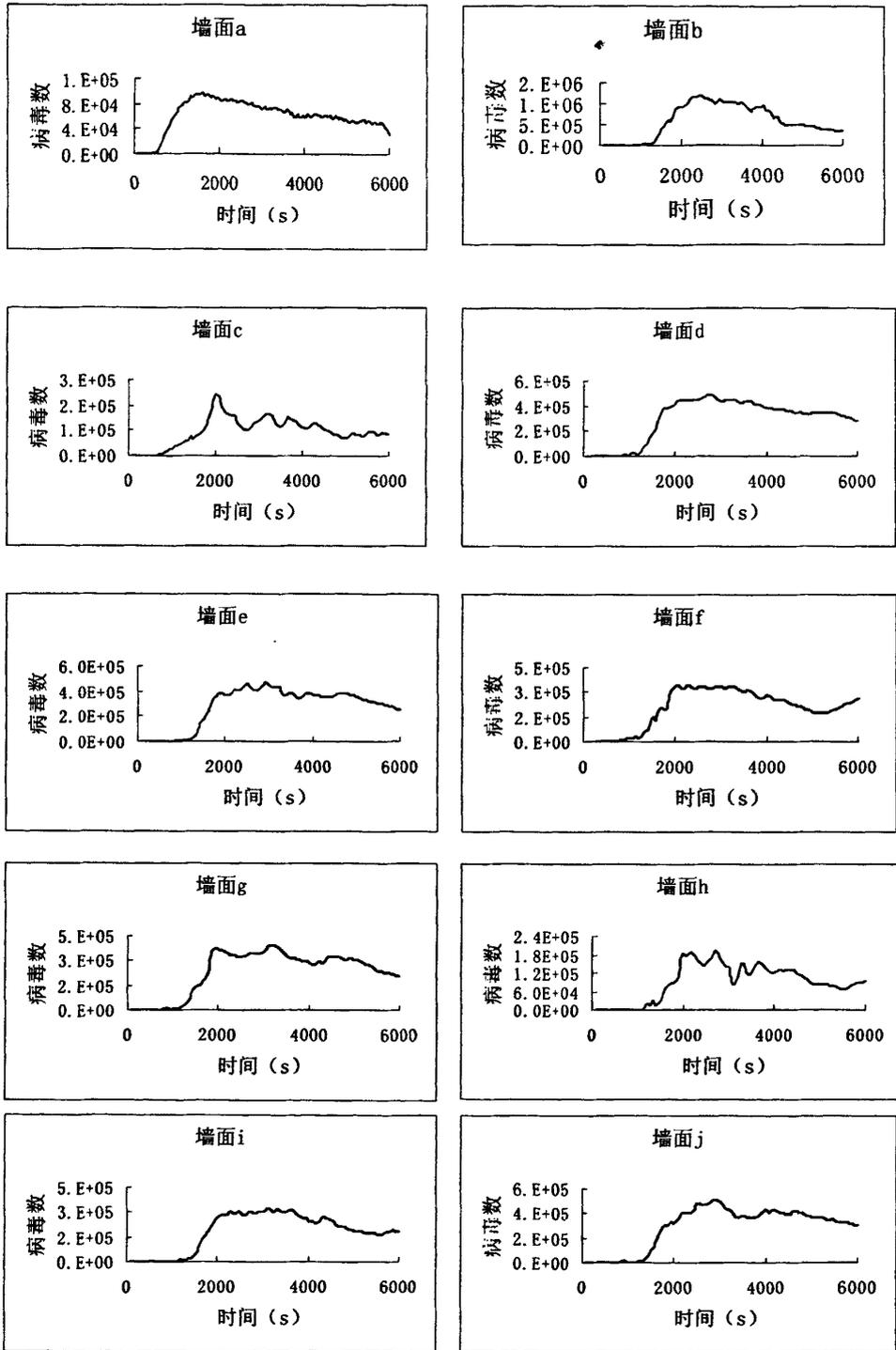


图 3-10 各墙面污染物浓度随时间变化图

第四章 流感病毒对建筑小区影响的二维模拟

甲型流感病毒 (Influenza A Virus) 是传染性较强的流感病毒, 能够引起鸟类、哺乳动物和人类的呼吸系统疾病, 直接威胁人类的健康及经济的发展, 一直是研究的热点。每到春秋两季, 总会爆发甲型流感病毒, 尤其在人口密度相对较大的建筑小区, 是发病的重灾区。故特别针对甲型流感病毒进行数值模拟, 希望能够对流感病毒爆发的过程有一个清晰的认识, 能够更好的预防流感, 减少其对人们生活的影响。

4.1 流感病毒的生长模型

由于每一种病毒的生长变化规律是不同的, 其生长变化曲线也是不一样的, 不同的病毒微生物都有与其更加适合的病毒生长模型。根据 Lars Mohler^[39]的工作, 使用上面的病毒动力学模型方程能够很好的模拟甲型流感病毒的生长变化情况。

$$\frac{dUc}{dt} = \mu \cdot Uc - k_{cdf} \cdot Uc - k_{vi} \cdot Uc \cdot V \quad (4-1)$$

$$\frac{dIc}{dt} = k_{vi} \cdot Uc \cdot V - k_{cdv} \cdot Ic \quad (4-2)$$

$$\frac{dV}{dt} = \mu_{vir} \cdot Ic \cdot t - k_{vd} \cdot V - k_{va} \cdot Uc \cdot V \quad (4-3)$$

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{C_{max} - (Uc + Ic)}{C_{max}} \quad (4-4)$$

这个数学模型描述了主体细胞和流感病毒之间最基本的关系。其中 Uc 代表未被感染的细胞数目, Ic 代表已被感染的细胞数目, 而 V 代表游离在细胞间的自由病毒。第一个式子是 Uc 的变化率, 其中 μ 是未被感染细胞的自然生长率, k_{cdf} 是未被感染细胞的自然死亡率, k_{vi} 是健康细胞与自由病毒接触后的感染率。第二个式子是 Ic 的变化率, 其中 k_{cdv} 是感染细胞的自然死亡率。第三个式子是游离病毒的变化率, 其中 μ_{vir} 是被感染细胞死亡后释放出来的病毒数目, 其中有一个时间延迟 t (t 是被感染细胞死亡后向外界释放的病毒的延迟时间), k_{vd} 是游离病毒的死亡率, k_{va} 是当自由病毒与健康细胞接触时被细胞吸收感染的概率。第四个式子能够根据 C_{max} (显微镜中微载体的面积) 以及 μ_{max} (最佳状态时病毒

的生长率) 求出 μ 。

表 4-1 流感病毒模型中各项参数的取值

参数	最佳数值	单位
k_{cdf}	0.001	h^{-1}
μ_{max}	0.03	h^{-1}
k_{vi}	0.0014	$mL \cdot h^{-1}$
k_{va}	0.8	$mL \cdot h^{-1}$
μ_{vir}	482	h^{-1}
k_{cdv}	0.0257	h^{-1}
k_{vd}	0.009	h^{-1}

表4-1是流感病毒生长模型中各项参数的取值及单位。这是Lars Mohler根据试验结果得出的最佳的模型参数值。根据对比, 该组数据能够很好的与试验中的流感病毒生长参数很好的吻合, 能够较为真实的表达流感病毒的生长规律。

在Lars Mohler的试验中, 最初状态时 C_{max} 取为 $1.2e^6$, 未被感染细胞数取为 $1.2e^6$, 感染细胞数为0, 而自由游离病毒数为 $2.6e^7$ 。利用上述的数据以及流感病毒群体动力学模型方程, 利用matlab中四阶标准Runge-Kutta求解方程的方法进行计算, 从而可以计算出6000s内甲型流感病毒的生长变化曲线, 如图4-1 所示,

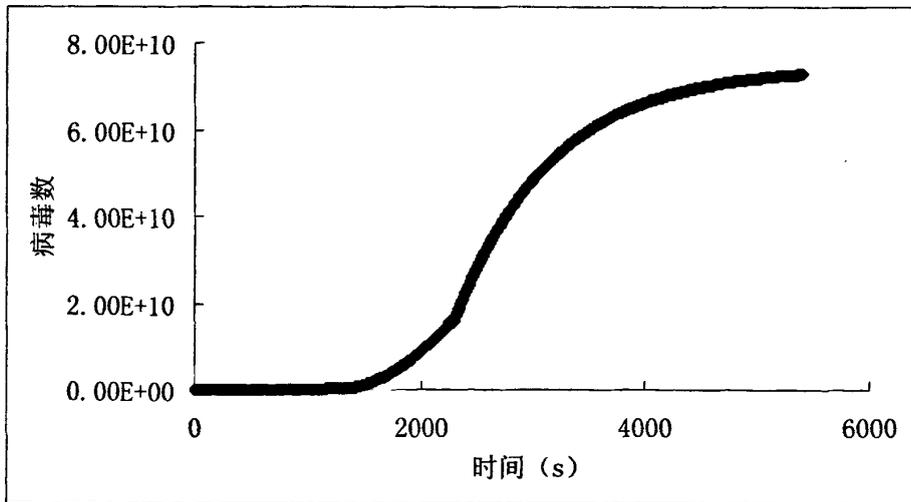


图 4-1 流感病毒的生长曲线

并以此生长曲线作为流感病毒在建筑小区内扩散的源强。

从图中可以看出,这与前面的一般性的非稳态污染物的生长曲线明显不同,它呈 S 型,在最初 2000s 生长相对缓慢,这是由于式子 (4-3) 中 t 的存在的原因,死亡的受感染细胞中的病毒要扩散到离散的自由病毒中,有一个较长的时间延迟,故而在曲线上表现的十分平缓而缓慢。2000s~4000s 是病毒的快速生长期,在这段时间中,迅速到达 $7e^{10}$,之后进入相对平滑的稳定期。

同样是选择如图 3-7 的前三后二的建筑小区的二维计算。选择离散求解的隐形求解, RNG $k-\epsilon$ 。进流边界取均匀流速 $u_i=5\text{m/s}$, 出流边界采用完全发展出流边界条件; 两侧边界, 用对称边界条件; 建筑物边界用无滑移的壁面条件。假设若流感病毒浓度在墙面中央区域达到 $3e^5$ 时, 就在该墙面区域产生一个新的流感病毒源。

4.2 结果与讨论

由于流感病毒具有的非稳定性,图 4-2 给出了污染物扩散随时间变化的图像,可以看出:

(1) 在病毒扩散的前 2000s, 流感病毒的扩散速度相对缓慢,从最大值的 $3e^6$ 到 $3e^{10}$, 扩散范围也相对很小,与上一章中一般性非稳态污染物扩散比较,明显扩散的比较缓慢,这也与它们各自不同的病毒生长曲线有关。

(2) 在 1000s,1500s 时, 流感病毒向建筑物 E 的方向扩散,这是由于在墙面 c 处产生了新的流感病毒源,并且在这个区域有一个顺时针的涡旋,虽然涡旋的速度较小,但是却影响了流感病毒的扩散方向,使得建筑物 E 的墙面 g 较早的受到了流感病毒的污染。

(3) 3500s 时, 能够很明显的看到在墙面 b、f、d、g 上都有新的流感病毒源的产生。并且建筑小区的大部分区域都有流感病毒的污染,这时的病毒浓度最大值为 $3e^{11}$ 。

(4) 从 4000s 开始, 墙面 b 的流感病毒浓度开始超过墙面 a, 开始成为整个小区中浓度最高的墙面, 并且墙面 f, e 也有挺高的病毒浓度。

(5) 到了 6000s 时, 墙面 b 的流感病毒已累计至 $1e^{12}$, 而同样处于建筑物背风处的墙面 e 以及墙面 j 的病毒浓度也达到了 $4e^{11}$ 。同一般性病毒污染物一样, 在背风区域病毒扩散困难, 病毒极易累计。可见建筑物的位置对流感病毒的扩散的确有很大的影响。

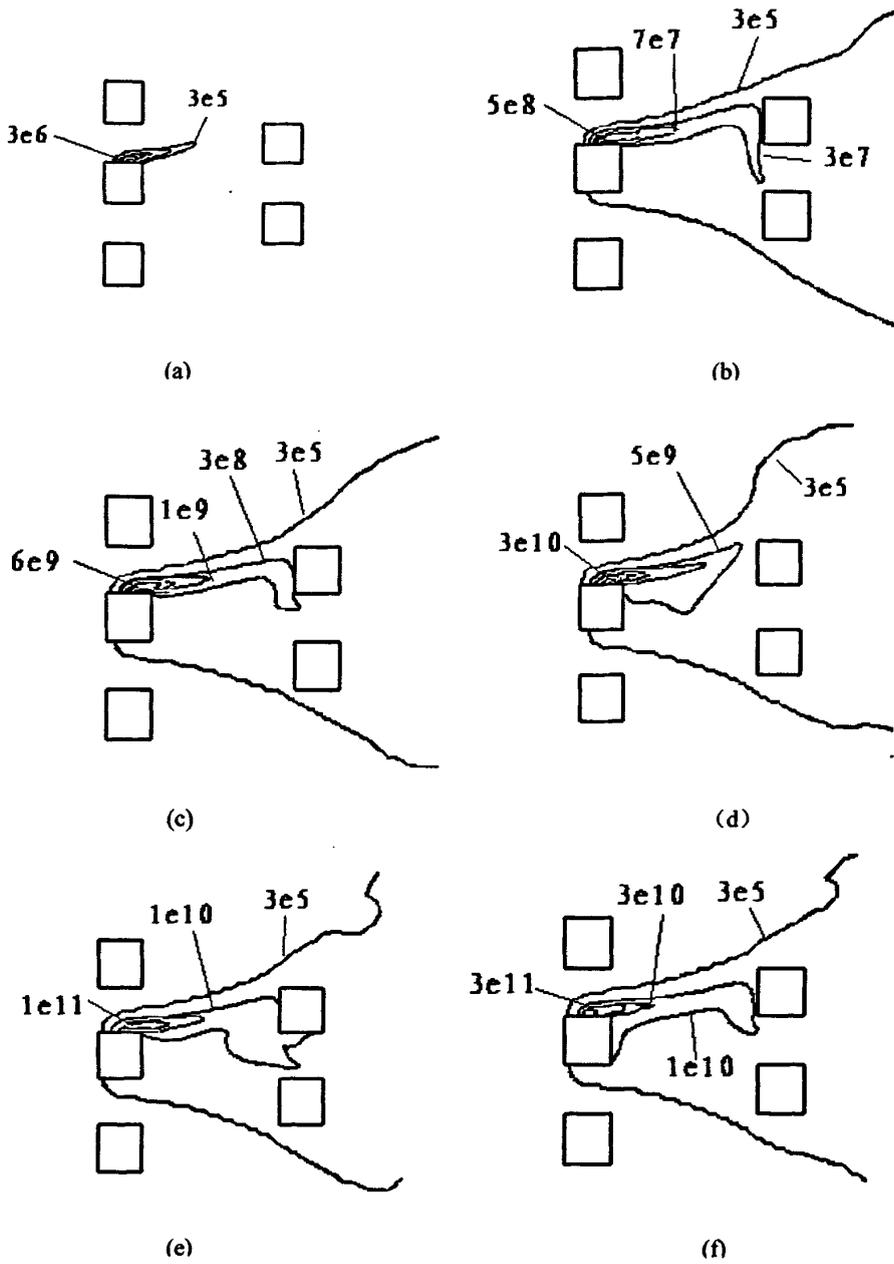


图 4-2 流感病毒浓度分布随时间变化图

(a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
 (g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

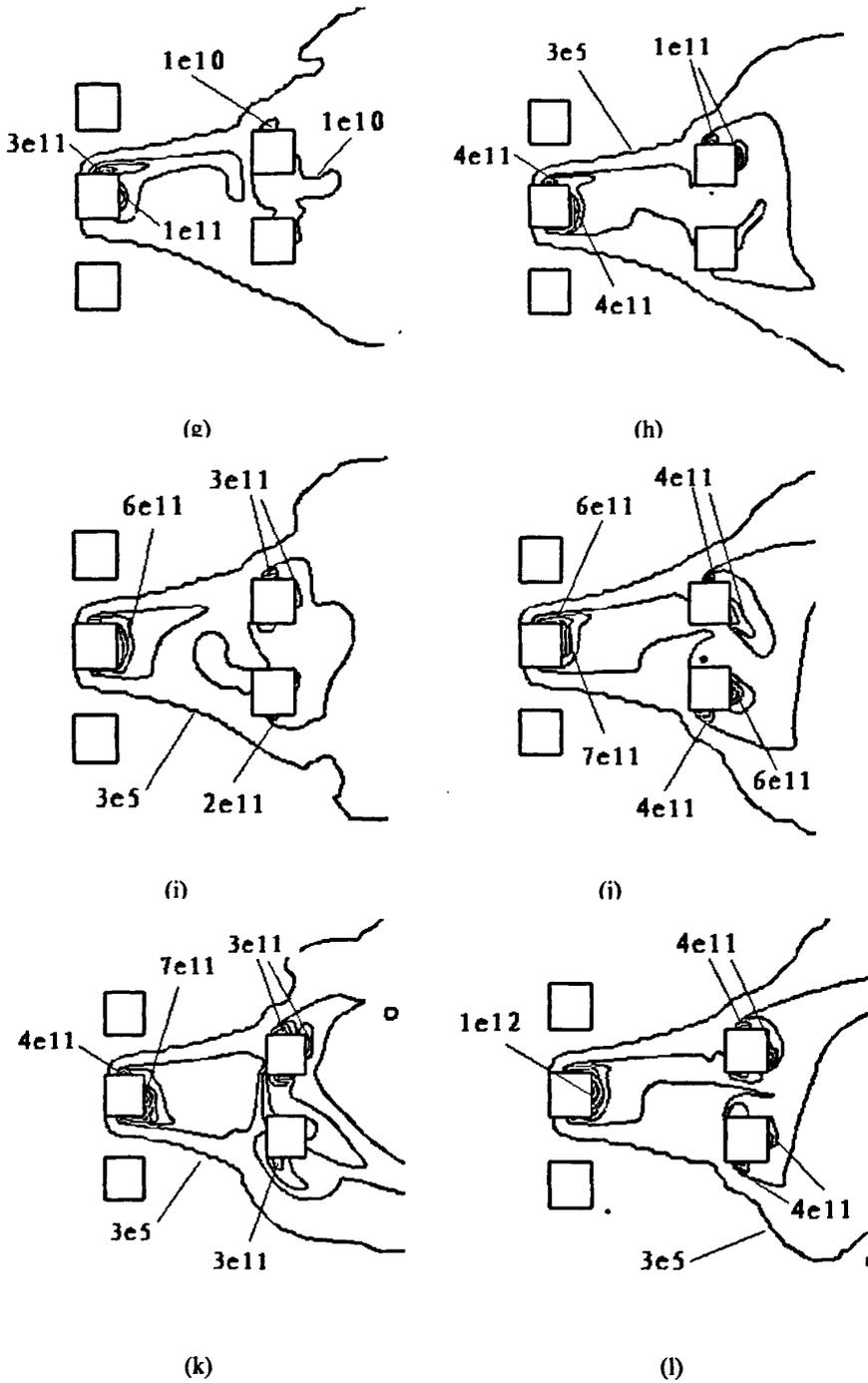


图 4-2 流感病毒浓度分布随时间变化图(续)
 (a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
 (g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

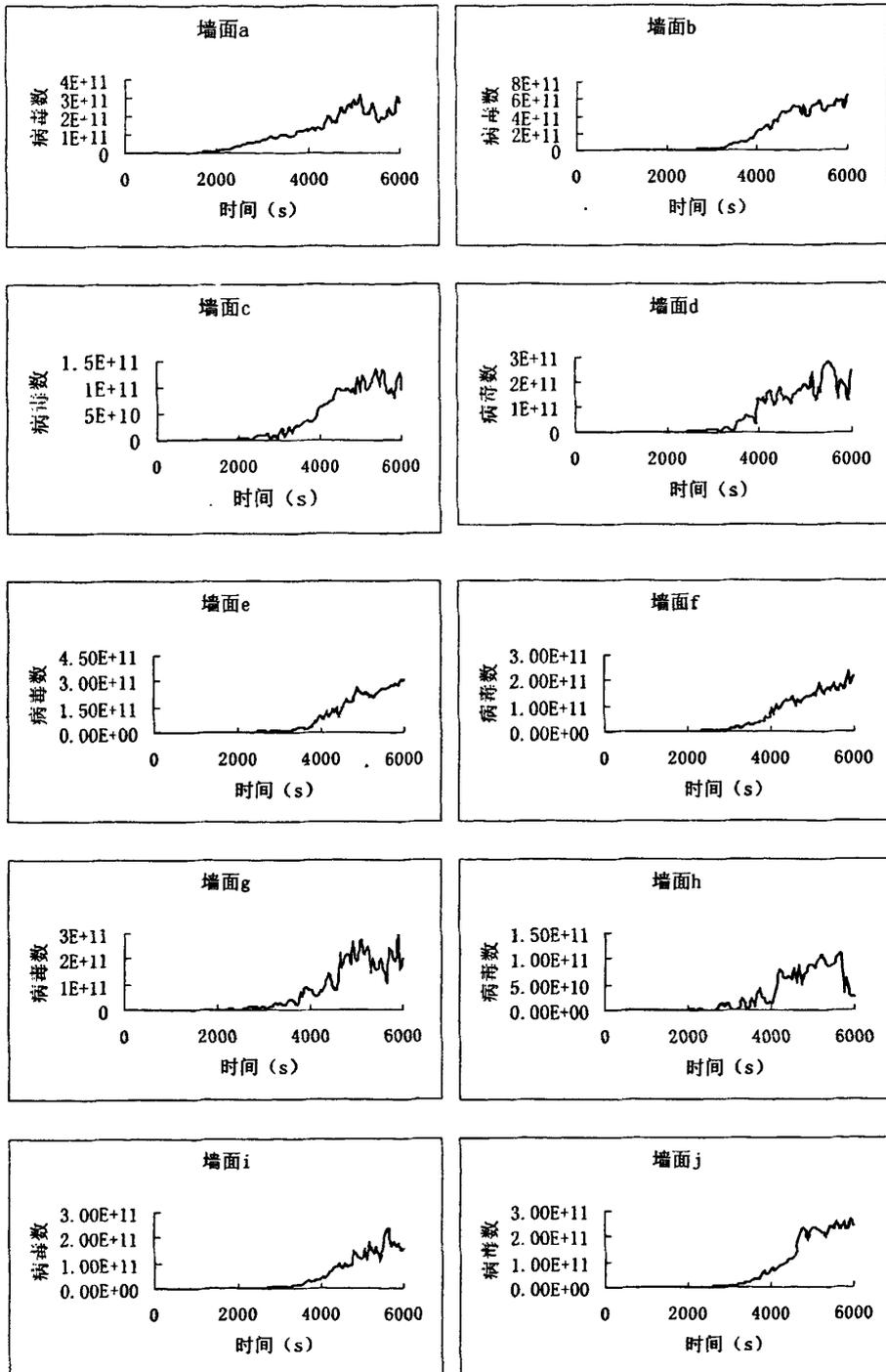


图 4-3 各个墙面上流感病毒随时间变化图

(6) 在流感病毒扩散的后期, 即 4000s~6000s 时, 以建筑物 B、D 以及 E 为中心, 形成一个大的三角形的病毒高发区。在这区域中空气流动较为缓慢, 致使产生的流感病毒滞留该区域, 成为小区内最大的污染区域。

(7) 无论最初的污染源还是新生成的污染源, 如果它位于建筑物间的高风速通道时则更加有利于其扩散, 而当病毒污染物位于建筑物后面的涡旋区时, 则易在建筑物表面形成累积。

图 4-3 给出了各个墙面上流感病毒随时间变化图像, 可以看出:

(1) 各墙面上流感病毒浓度随时间变化图与一般性的非稳态污染物的变化图对比一下, 会发现两者大不相同。由于流感病毒生长变化曲线 2500~4000s 才是快速生长期, 而一般性非稳态污染物的快速生长期是 500~2000s。所以图中流感病毒前期 (0~2000s), 流感病毒的扩散浓度都比较小, 大多低于 $1e^{10}$ 。而到了扩散后期, 进入流感病毒快速生长期, 其浓度大幅度的提高, 普遍能达到甚至超过 $1e^{11}$ 。

(2) 墙面 a 是最初的流感病毒发源地, 只受一个病毒源的影响。墙面 a 的流感病毒浓度情况的趋势大体还是与流感病毒的生长曲线吻合的。从 2000s 时开始进入浓度的快速增长期, 它的最大值能达到 $3e^{11}$, 出现在 5200s 左右的时间段。

(3) 墙面 b 依然是流感病毒累计最高的墙面。在 2500s 左右进入浓度的快速增长期, 在 5000s 进入稳定期, 其最大值能达到 $6e^{11}$, 比墙面 a 还高出 $3e^{11}$ 。墙面 a 与 b 的稳定期都波动不大, 这也与它们处于上风区, 受病毒源影响小有关。

(4) 墙面 d, g, h 的波动性都挺大的。它们都处于建筑群中的大涡旋附近, 而墙面 d, g 还受到建筑物 D、E 间小漩涡的影响, 同时他们之间新产生的流感病毒源彼此影响, 故而起伏较大, 没有明显的稳定期。而墙面 h 在 5800s 有一个较大的浓度降低, 这或许与顺时针的大漩涡有一定的关系, 将病毒大量带离墙面附近。

(5) 墙面 e, j 处于建筑物的背风区, 在 6000s 时还处于其浓度的增长期, 在 6000s 时均能达到 $3e^{11}$ 。这两个区域也将会是流感病毒的聚集区域, 成为流感浓度偏高的两个墙面。

第五章 流感病毒对建筑小区影响的三维数值模拟

虽然二维模拟能够较快的得出模拟结果，但是，由于在实际的病毒扩散中，建筑小区是一个三维空间，对其进行三维的数值模拟能够更准确的反映其流场和流感病毒扩散情况。下面就利用三维模型进行计算模拟。

5.1 三维模型的建立

前排三栋后排二栋的建筑小区如图 5-1 所示，建筑物的长 \times 宽 \times 高为 $H \times H \times 4H$ ，同排建筑物的间距为 H ，前后排建筑物的间距为 $3H$ 。经过计算，确定计算域为 $40H \times 18H \times 12H$ ，其中 $H=15\text{m}$ 。

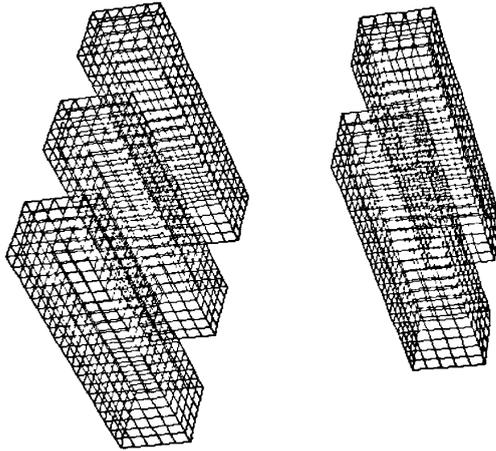


图 5-1 建筑小区的三维模型

5.1.1 边界条件

进流边界取大气边界层风速剖面公式 $u = u^* / \kappa \ln(z/0.00025)$ ，其中 u^* 是摩擦速度， κ 为卡门常数（通常取为 0.4）。出口边界采用完全发展出流边界。两侧边界和上边界，使用对称边界条件；建筑物及地面使用无滑移壁面。 k 与 ε 的取

值采用较为常用的公式:

$$k = 0.5(ul)^2 \quad (5-1)$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} / l \quad (5-2)$$

其中, I 为湍流强度, l 为湍流尺度, 其值采用 Murakami 等的实验数据。将实验数据曲线拟合, 得到下式:

$$I = -0.0711 \ln \left(\frac{2z}{h_{ref}} \right) + 0.231 \quad (5-3)$$

$$l = 1.1974z \left(\frac{2z}{h_{ref}} \right)^{-0.0458} \quad (5-4)$$

污染源用第四章中流感病毒生长模型。假设在墙面 a 的 $3.5H$ 高度产生了流感病毒, 并随着时间向小区的其他地方扩散。由于三维空间中可能产生新的污染源的位置太多, 所以三维计算时, 不考虑继发感染, 假设建筑小区中流感病毒不产生新的污染源, 故计算都只有唯一的污染源, 即最初的流感病毒污染源。

5.2 流感病毒的三维模拟结果与讨论

高层建筑的风速场如图 5-2 所示。可以看出, 在离地 50m 处, 风速场与二维

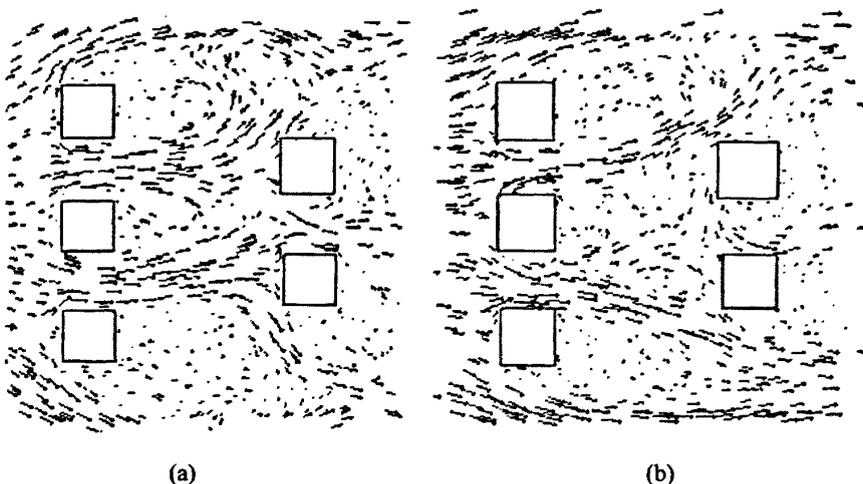


图 5-2 高层建筑中不同高度的风速场

(a) 10m (b) 50m

情况(图 3-8)非常接近,但离地 10m 处,风速场波动较二维明显。这应该是由于离地面较近的区域的气流更多的受到近地面障碍物的影响,并且还有地面的反弹作用,使得湍流作用较远地区要强。总体说来,二维与三维的风速场还是大体接近的,因此,二维模拟的结果也有一定的指导意义。

图 5-3 给出不同时间流感病毒在建筑小区的分布图(离地 3.5H 高度)。可以得出:

(1) 由于假设不产生新的流感病毒源,所以墙面 a 在整个扩散期间它的病毒浓度都是最高的,从 500s 时的 $3e^6$ 到 6000s 时的 $7e^{11}$,并且远远高于其他墙面的流感病毒浓度。

(2) 建筑物 B 受到流感病毒的影响最大,墙面 b 在不同时期也受到不同程度的流感病毒影响,仅次于墙面 a。而建筑物 D 也受到较多的病毒影响。在 1500s 以后,建筑物 D 的墙面 c 上病毒浓度就高于 $7e^8$,甚至达到了 $1e^{11}$ 。墙面 d 和 e 上浓度也不低,建筑物 D 是受到病毒影响的主要区域。到了扩散的后期,建筑物 E 也受到了一定的病毒影响,达到 $4e^{10}$ 的病毒浓度。

(3) 在整个扩散期间,受到病毒污染的墙面包括建筑物 B 的墙面 a、b,建筑物 D 的墙面 c、d、e、f 以及建筑 E 的墙面 g 以及 j,并不包括墙面 h 与 i。随着病毒扩散到后期,在建筑物的背风区域,如墙面 e 和 j 形成一个浓度不小的病毒区域,难以扩散出去。

(4) 如图 5-3-i 所示,建筑物 D 完全被流感病毒所包围,浓度都在 $4e^{10}$ 左右,是整个小区中污染面积最广的建筑物,也是值得高度重视的建筑物。室内必要的通风能够减小流感病毒在建筑物周围的聚集,使之顺利向下风向扩散。

(5) 用三维模型分析得出的污染物扩散规律基本上与二维结果一致,都显示污染源周围的浓度明显高于其他区域的浓度,在建筑物的背风区域以及建筑物之间形成的涡旋区域都是病毒污染物累计的场所。虽然真实情况中垂直湍流及地面反射会对结果的准确性带来一些影响,使得在近地面的二维计算不如三维计算准确,但是,用二维模型定性的计算均一地面粗糙度下水平方向上的污染物扩散规律还是可行的。

如图 5-4 所示,不同时间流感病毒在建筑小区的垂直分布图(污染源 xz 方向平面),可以看出:

(1) 流感病毒污染物总体趋势是向前上方扩散传播,遇见障碍物(后排的建筑物)时,会受阻并累计。在风力作用下,流感病毒污染物会绕过建筑物顶部扩散。

(2) 由于湍动和大涡作用,病毒扩散呈现波动形状。污染源处的病毒在空

气的扩散作用下也向下方扩散,污染墙面a的下方区域,6000s时浓度能达到 $4e^{10}$ 。

(3) 在 1500s 时,流感病毒扩散到建筑物 D 的墙面 c。一部分病毒被建筑物阻挡而反弹回来,一部分病毒从障碍物上方越过建筑物继续扩散。

(4) 在 4000s 时,建筑物 D 累计病毒为 $8e^{10}$,大量的病毒被反弹回去,形成了一个纵向的漩涡,也有少量病毒向建筑物的下方扩散,影响墙面 c 的下方区域。

(5) 在 6000s 时,当污染源处浓度为 $7e^{11}$,建筑物 D 周围的浓度将达到 $1e^{11}$,顶部达到 $4e^{10}$,建筑物 D 的 2H 高度也受到了病毒的污染。

(6) 当病毒扩散前方有障碍物时,必将使得其在障碍物前形成回流,而使得大量的污染物的累计。当障碍物不够大时,病毒也会绕过障碍物继续向前扩散。所以当建筑物高度宽度过大,对污染物扩散有一定影响。

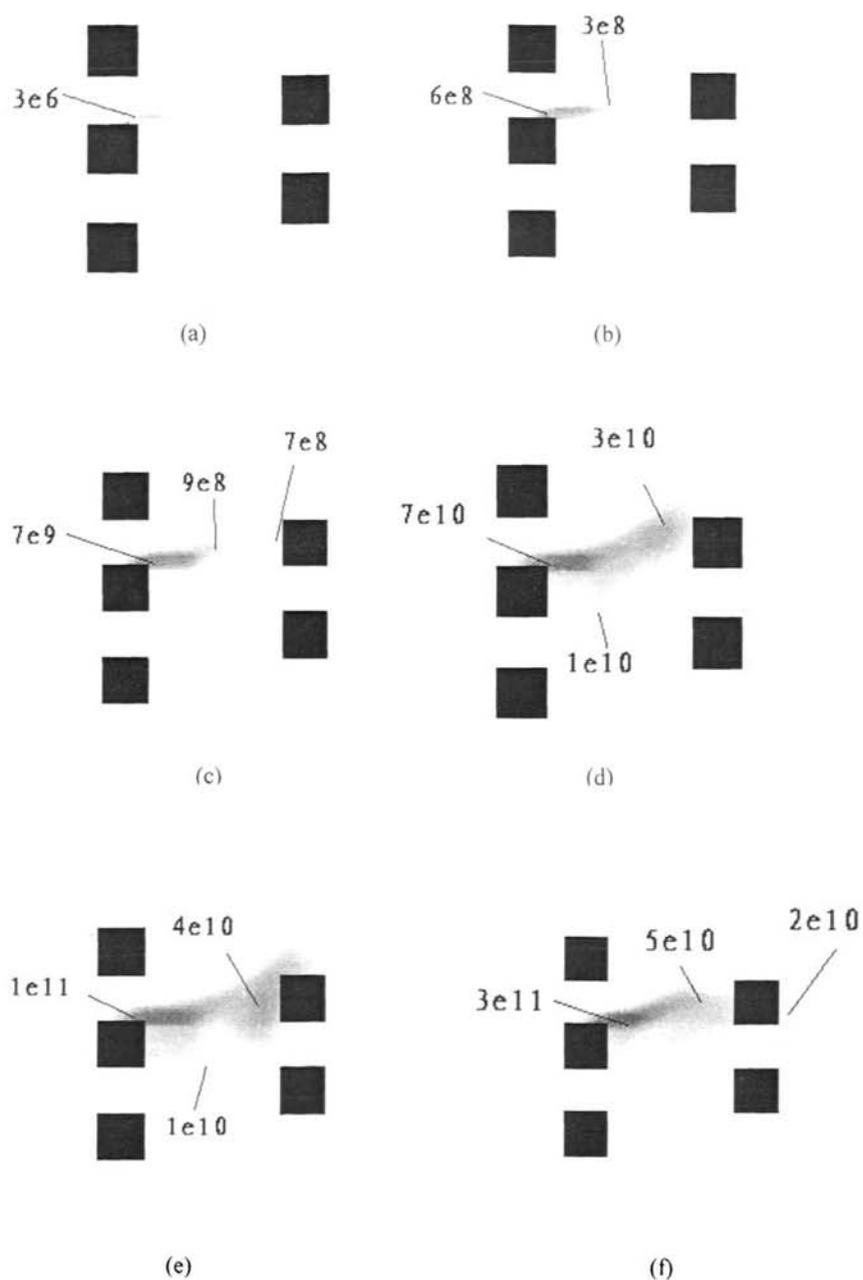


图 5-3 不同时间流感病毒在建筑小区的分布图 (离地 3.5H 平面)
 (a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
 (g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

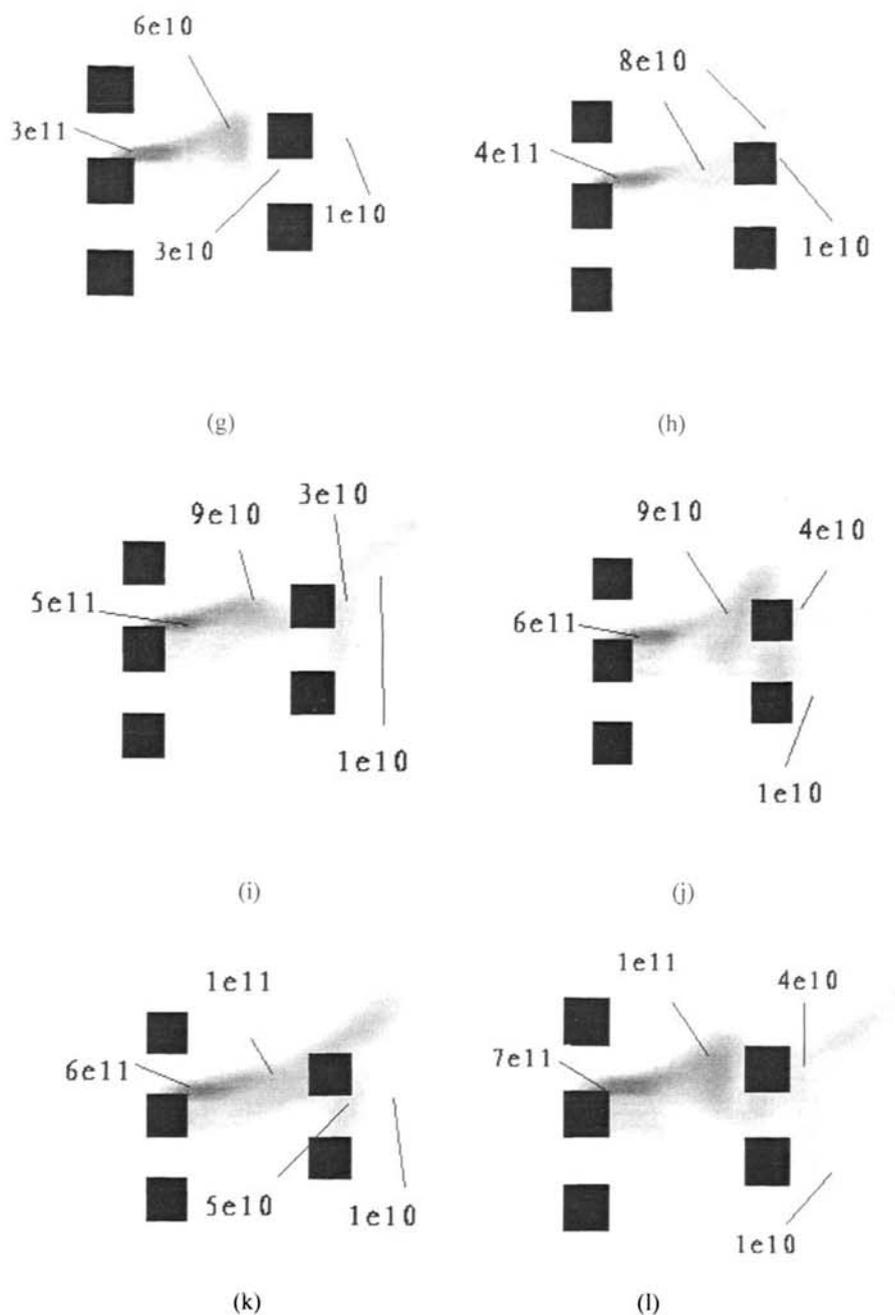


图 5-3 不同时间流感病毒在建筑小区的分布图（离地 3.5H 平面）（续）
 (a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
 (g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

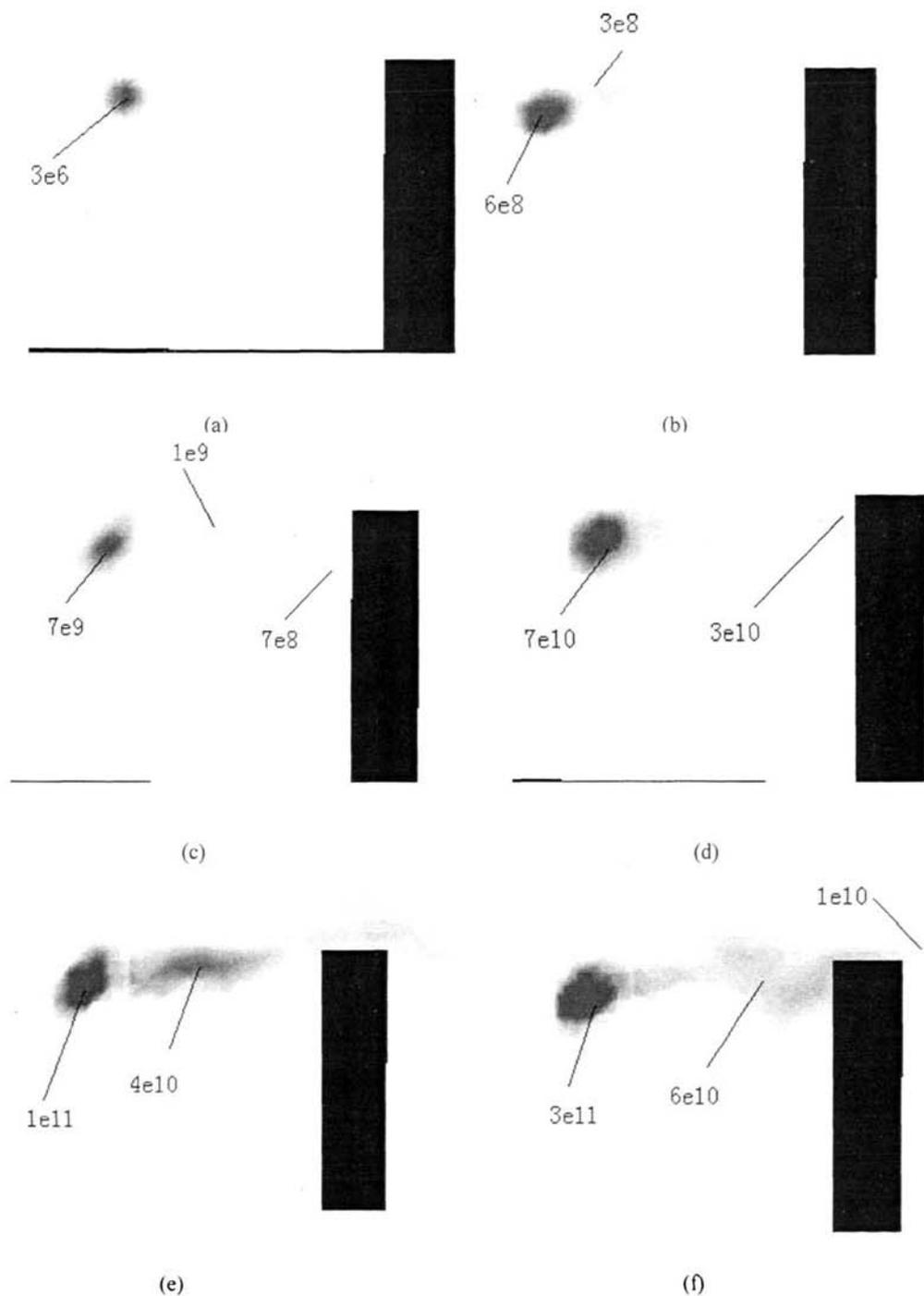


图 5-4 不同时间流感病毒在建筑小区的分布图（污染源 xz 方向平面）

(a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s

(g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

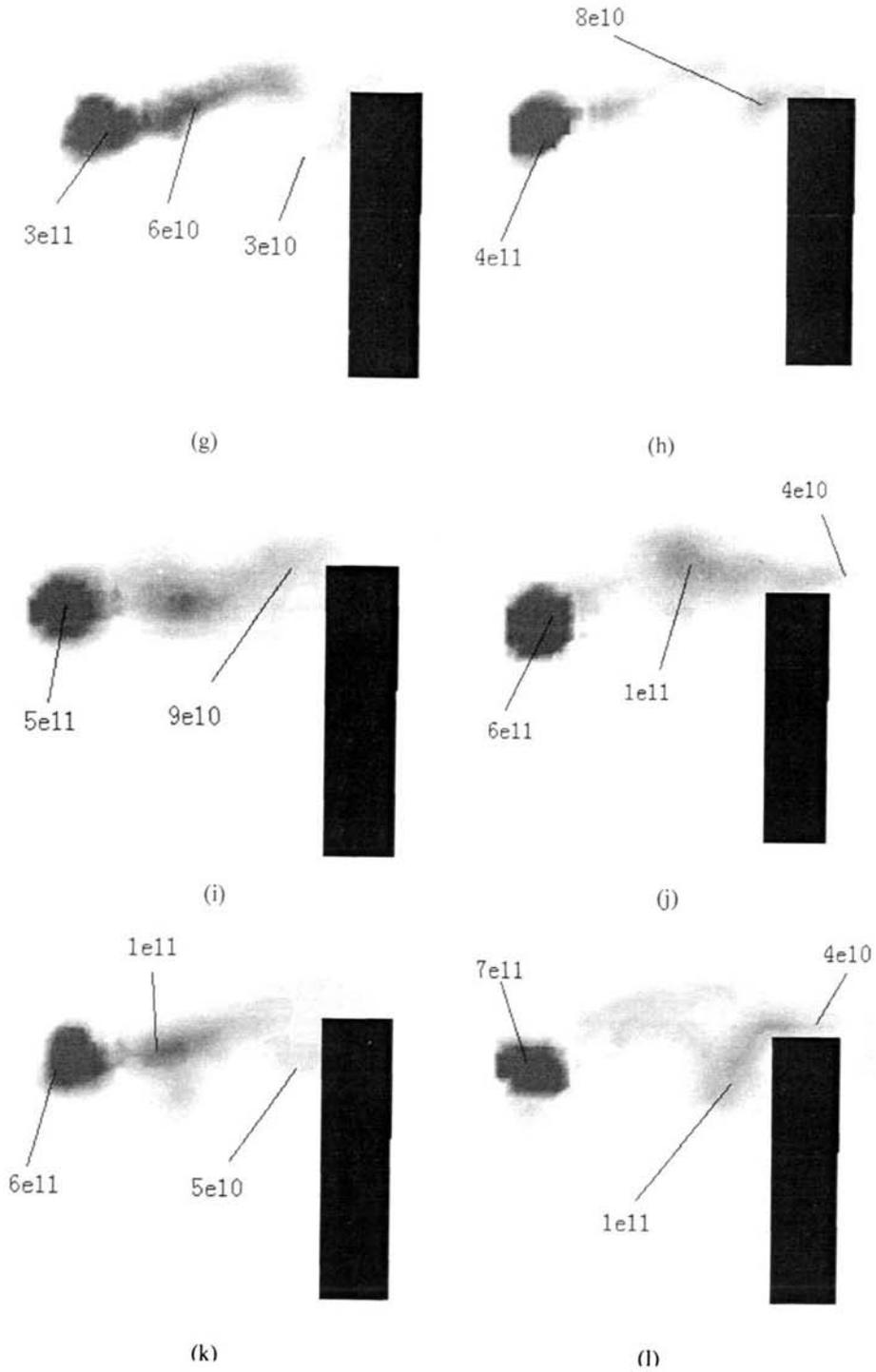


图 5-4 不同时间流感病毒在建筑小区的分布图（为污染源 xz 方向平面）（续）
 (a) 500s (b) 1000s (c) 1500s (d) 2000s (e) 2500s (f) 3000s
 (g) 3500s (h) 4000s (i) 4500s (j) 5000s (k) 5500s (l) 6000s

第六章 结论与展望

6.1 主要结论

本文分别利用二维和三维数值模型,研究了非稳态污染物在建筑小区中的扩散问题。重点研究了甲型流感病毒的群体动力学模型,并利用其生长曲线,计算模拟了它在建筑小区内扩散情况。

以二维水平方向的建筑群为数值模拟的基本对象,研究了非稳态污染物在有五栋建筑物的建筑小区中的扩散情况,并分析了建筑物周围的风速场,研究结果表明无论最初的污染源还是新生成的污染源,如果位于建筑物间的高风速通道时更加有利于其扩散,而当病毒污染物位于建筑物后面的涡旋区时,则易在建筑物表面形成累积。

在考虑继发感染后,如果在病毒扩散的中后期仅将最初的病毒源清除或隔离,对小区内的病毒扩散并无太大的影响。所以发现病毒扩散以后,必须对所有可能产生新的病毒污染源的区域加以检查并隔离污染源。任何被遗漏的污染源都可能在适宜的生长的环境下生长,扩散,产生新的污染源。

流感病毒由于其特别的生长曲线,使得扩散前期有一段漫长的隐藏期,然后随着扩散时间推移,病毒数目增长很快,病毒主要的累计区域还是建筑物背风区域的涡旋地带。

三维模拟能够比较准确的反映建筑小区中流场的分布,以及流感病毒的扩散情况。与二维风速场的对比,得出二维计算能够较准确的反映流场分布。

总之,二维和三维模拟结果都显示污染源周围的浓度明显高于其他区域的浓度,在建筑物的背风区域以及建筑物之间形成的涡旋区域是病毒污染物累计的区域。同时,任何病毒污染源在它浓度快速增长以前都有时间不等的隐藏期,这就需要在它快速扩散以前尽快将它隔离,以免其扩散并产生新的病毒污染源。

6.2 展望

1、复杂建筑群内非稳态污染物扩散研究

建筑物间污染物扩散的模拟目前还处于起步阶段,本文所研究只讨论了简单建筑群结构,还有很多工作要做,例如:

(1) 湍流模型是流体力学研究领域尚未很好解决的难题。由于湍流的复杂性必将给建筑物间污染物的扩散的模拟结果带来不准确性;

(2) 建筑小区应该是多种多样的,并不仅仅局限于几栋建筑,等距的布局以及固定的风向,这都需要投入更多的时间来进行研究;

(3) 世界各地的气象条件和地形环境都不同,对污染物的影响更是千差万别,要找出其中共同的规律,找出各种影响因素彼此间的关系;

(4) 本文研究了非稳态污染物对建筑群的影响,同样也可研究非稳态污染物对建筑物内部的污染过程,对建筑物内部的布局有指导意义;

(5) 本文研究的是点源的污染物,尚还有线源、面源的污染物可以研究。线源、面源的非稳态扩散将更加的复杂,其影响因素也将更多。

2、建立空气中传播的致病性微生物预警系统

近几年空气中传播的微生物引起的疫病的不断出现,使得该研究特别是微生物预警系统成为研究的热点,如欧洲口蹄疫爆发预警系统的研究、我国中科院的非典病毒预警系统等。本文引入病毒感染群体动力学模型机制,为空气中传播的致病性微生物预警系统建立提供了依据。

参考文献

- [1] Yu ITS, Li YG, Evidence of airborne transmission of SARS-Reply, *New England Journal of Medicine*, 2004, 351(6): 611~611
- [2] 郭元吉, 程小雯, 流行性感病毒及其实验技术, 北京: 中国三峡出版社, 1997
- [3] A Walton, A.Y.S. Cheng, W.C. Yeung, Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-Part I: comparison with field data, *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 3601~3613
- [4] 《北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究》课题组, 城市规划与大气环境, 北京: 气象出版社, 2004, 50~90
- [5] Dewulf J, Laevens H, Koenen F, Airborne transmission of classical swine fever virus under experimental conditions, *Veterinary record*, 2000, 147(26): 735~738
- [6] 马知恩, 周义仓, 传染病动力学的数学建模与研究, 北京: 科学出版社, 2004, 30~60
- [7] 谢天恩, 普通病毒学, 北京: 科学出版社, 2002, 56~70
- [8] Mikkelsen T, Alexandersen S, et al, Investigation of airborne foot-and-mouth disease virus transmission during low-wind conditions in the early phase of the UK2001 epidemic, *Atmos. Chem. Phys*, 2003, 3: 2101~2110
- [9] Donaldson A.I, Alexandersen S, Predicting the spread of foot and mouth disease by airborne virus, *Rev. sci. tech. off. int. Epiz*, 2002, 21(3): 569~575
- [10] Yu its, Li YG, Wong TW, et al, Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus, *New England journal of medicine*, 2004, 350(17): 1731~1739
- [11] 李颖, 天津市流感病毒分子流行病学的初步研究, 硕士学位论文, 天津医科大学, 2003
- [12] 韩占忠, 王敬, 兰小平, FLUENT 流体工程仿真计算实力与应用, 北京: 北京理工大学出版社, 2004, 10~30
- [13] Fluent inc. FLUENT User's Guide, Fluent Inc. 2003
- [14] Fluent int. FLUENT User Defined Function Manual, Fluent Inc. 2003
- [15] Fluent inc. GAMBIT Modeling Guide, Fluent Inc. 2003

- [16] 王福军, 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用, 北京: 清华大学出版社, 2004, 1~23
- [17] 刘庆全, 基于 Fluent 的合理沉没度仿真系统研究, 硕士学位论文, 哈尔滨理工大学, 2005
- [18] 陶文铨, 数值传热学, 西安: 西安交通大学出版社, 1988, 257~300
- [19] 赵秉文, 低矮型建筑风荷载的分析、实验及数值模拟, 硕士学位论文, 西安建筑科技大学, 2005
- [20] 赵鸣, 苗曼倩, 大气边界层, 北京: 气象出版社, 1992, 1~15
- [21] 华敏洁, 大气环境质量模型和 GIS 结合的研究, 硕士学位论文, 上海师范大学, 2005
- [22] 郑彤, 陈春云, 环境系统数学模型, 北京: 化学工业出版社, 2003, 156~189
- [23] 周光炯, 严宗毅, 许世雄等, 流体力学, 北京: 高等教育出版社, 2000
- [24] 韩冰冰, 三维湍流流场数值计算方法的研究, 硕士学位论文, 西北工业大学, 2006
- [25] Y.Gao, W.K.Chow, Numerical studies on air flow around a cube, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2005, 93: 115~135
- [26] C.J.Chen, S.Y.Jaw, *Fundamentals of turbulence modeling*, Taylor & Francis, Washington, 1998
- [27] B.E.Lauder, D.B.Spalding, *Lectures in mathematical models of turbulence*, Academic press, London, 1972
- [28] Mikkelsen T, Alexandersen S, et al, Investigation of airborne foot-and-mouth disease virus transmission during low-wind conditions in the early phase of the UK2001 epidemic, *Atmos. Chem. Phys*, 2003, 3: 2101~2110
- [29] T.L.Chan, Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon, *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 861~872
- [30] T.H.Shih, W.W.Liou, A.Shabbir, et al, A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, *Compute Fluids*, 1995, 24(3): 227~238
- [31] A.Walton, A.Y.S.Cheng, Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon-Part II : idealized canyon simulation, *Atmospheric environment*, 2002, 36: 3615~3627
- [32] Huang huaxiong, Prosperetti A, Effect of grid orthogonality on the solution accuracy of the two-dimensional convection-diffusion equation, *Numer Heat Transfer, Part B*, 1994, 26: 1~20

- [33] 胡族琼, SARS 冠状病毒 Mc 区的克隆表达及表达蛋白抗原活性研究, 硕士学位论文, 西北工业大学, 2005
- [34] 赵云玲, 鸡舍及其环境微生物气溶胶研究, 硕士学位论文, 山东农业大学, 2001
- [35] Steven Roberts, Michael A.Martin, Investigating the mixture of air pollutants associated with adverse health outcomes. *Atmospheric environment*, 2006, 40: 984~991
- [36] 丁思统, 余翔华, 吴承祯, Verhulst 模型及其应用, 江西: 江西林业科技, 1992, 38~40
- [37] Y.Sidorenko, U.Reichl, Structured Model of Influenza Virus Replication in MDCK Cells. *Biotechnology and Bioengineering*, vol88, no.1, 2004
- [38] 王开发, 邱志鹏, 病毒感染群体动力学模型分析, *系统科学与数学*, 2003, 23 (4): 433~443
- [39] Lars Mohler, Dietrich Flockerzi, Heiner Sann Mathematical Model of Influenza A Virus Production in Large-Scale. *Microcarrier Culture Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 190(1)

致 谢

本论文的工作是在我的导师尤学一教授的悉心指导下完成的,尤学一教授严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年来尤学一老师对我的关心和指导。

尤学一教授悉心指导我们完成了实验室的科研工作,在学习上和生活上都给予了我很大的关心和帮助,在此向尤学一老师表示衷心的感谢。

尤学一教授对于我的科研工作和论文都提出了许多的宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在实验室工作及撰写论文期间,师姐李莉、黄道君、刘伟、郑敬茹,师兄李胜华、肖厚蓬,以及于顺东、常淑玲、景琦、郭丽祥等同学对我论文中的研究工作给予了热情帮助,在此向他们表达我的感激之情。

另外也感谢我的家人,他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。谢谢爸爸妈妈,两年来为我的工作和学习操心了,辛苦了!