

CFD 方法在街巷气象场模拟和预测中的应用

闫敬华^{1,2} 戴光丰¹ 袁卓建²

(1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080; 2. 中山大学大气科学系)

提 要: 为开发建立米级分辨率的城市街巷气象场模拟预测方案, 以 PHOENICS 为例介绍了计算流体力学 (CFD) 方法的原理, 讨论了该方法应用于街巷气象要素数值计算的可行性。提出了一种基于 CFD 模型与高分辨率数值天气预报模式嵌套的街巷气象场模拟预测方案, 并对边界嵌套问题作了多种敏感性分析, 表明嵌套对街巷气象场计算具有必要性和可行性; 另外, 还讨论了分辨率对计算结果和计算耗时影响; 最后, 用实例介绍了本方案的应用, 并讨论了本方法的应用前景。

关键词: CFD 街巷 气象场 模拟 预测 嵌套

Application of CFD Method to Simulation and Prediction of Meteorological Fields for Street Lane

Yan Jinghua^{1,2} Dai Guangfeng¹ Yuan Zhuojian²

(1. Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080;
2. Department of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University)

Abstract: Taking PHOENICS as example, the principles of computational fluid dynamics (CFD) is described. The feasibility of applying the CFD method to numerical calculation of meteorological elements for street lane is discussed. A scheme for simulating and predicting meteorological fields in street lane is proposed, which is based on the nested CFD model into high-resolution numerical weather prediction model. A number of sensitivity analyses are run for the nesting problems at the boundary. It shows that nesting treatment is necessary and feasible in the calculation of meteorological fields. In addition, the effect of resolution on the

results and duration of calculations is also discussed. In the final section, real cases are used to illustrate the application of the proposed scheme and the potential usefulness of the method.

Key Words: calculation fluid dynamics (CFD) street lane meteorological fields simulation prediction nesting

引 言

街巷局地气象场的模拟,目前主要有风洞实验、边界层模式和计算流体力学模型三种方法。1999年,钮珍南^[1]等利用风洞试验模拟了某体育中心主体育场内的风场,并考虑了外场风对内场风的影响,李会知^[2]和王勋年^[3]等也分别对城市建筑风和建筑物行人高度风环境进行了风洞试验的研究。由于风洞试验的周期长、价格昂贵,近来对于城市街巷的大气流动和污染物扩散常采用数值模拟的方法,1998年,Hassan等模拟了街区里的空气流动和污染物的扩散过程^[4];Lee等研究了城市街道峡谷中的污染物传输和扩散的参数化^[5];张宁等用边界层模式对街区内的气流进行了数值模拟与分析^[6];Pospisil等通过理想化的街道峡谷建立计算模型,选择了理想化和实测两种边界风速条件,模拟了在该街道峡谷的风速分布情况,取得了比较好的效果^[7]。在此基础上,李磊等^[8]利用CFD软件建立了一个三维街道十字路口模型,模拟了街区风速和CO质量浓度分布。汪立敏等^[9]则研究了等高和不等高非孤立街道峡谷的大气流动及其汽车排放污染物扩散特征,结果与风洞试验相比较吻合。

CFD方法是近代流体力学、计算数学和计算机科学结合的产物,是利用高速计算机求解控制流体流动的偏微分方程组,定量求取流体流动状态的方法。其中选择合适的边界条件对准确反映流动性质至关重要,准

确合理的边界条件是使CFD计算解正确的必要条件。

目前常用的商业CFD软件有:StarCD、FIRE、KIVA、CFX-5、FLUENT、PHOENICS等。其中PHOENICS软件是世界上第一套专业化的计算流体与计算传热学商用软件,是英国CHAM公司开发的模拟传热、流动、反应、燃烧过程的通用CFD软件,至今已有30多年的历史,并不断更新升级。其网格系统包括:直角、圆柱、曲面、多重网格、精密网格。可以对三维稳态或非稳态的可压缩流或不可压缩流进行模拟,包括非牛顿流、多孔介质中的流动,并且可以考虑粘度、密度、温度变化的影响。PHOENICS内置了多种适合于各种Re数场合的湍流模型,包括雷诺应力模型、多流体湍流模型和通量模型及k-ε模型的各种变异,共计21个湍流模型,8个多相流模型,10多个差分格式。PHOENICS的开放性和可拓展性很好,可最大限度地向用户开放程序,提供对软件现有模型进行修改、增加新模型等功能和接口,可以用FORTRAN语言进行二次开发。在3.6版本中,引入了PLANT及Inform功能使用户不再需要编写FORTRAN源程序,GROUND程序功能使用户修改添加模型更加任意、方便。因此,适合于街区局地气象场计算的应用。

但是,以往工作基本上还只是局限于理想化或特定条件下(如取定某一固定的背景风和设定的热力条件)的模拟计算,计算结果也只具有环境评价或气候意义,并不能得

出实际天气条件下和瞬息变化的真实的街巷气象场。随着近年高分辨率数值天气预报技术的发展,能够反映城市效应的公里级分辨率数值天气预报模式已成为可能。因此,我们尝试将 CFD 模型与公里级高分辨数值天气预报模式嵌套,发挥两种模型各自的长处,实现实际天气条件下街巷米级分辨率气象场的模拟预测,取得了良好的效果^[10]。本文对这一方案进行分析讨论和介绍。

1 CFD 方法在街巷气象要素模拟预测中的可行性分析

1.1 采取的方案

为了实现实际天气下城市街巷气象场的计算和预测的目的,我们尝试了将 CFD 模型与高分辨数值天气预报模式相结合的方法。前者具备在复杂建筑体影响下流体流动细致计算的能力,但不具备天气过程及其演化的计算预测功能;而后者相反,可以有效地反映实际天气条件下城市下垫面的宏观效应,诸如城市热岛、城市辐合效应等等,给出包含城市效应的环境气象场的分布及其演变预测。实际天气环境场的三维分布及其时间演变信息可以通过嵌套影响 CFD 的计算

结果,从而使 CFD 模型能够通过初边值有效获取真实、细致和时变的城市气象环境场信息,进而模拟预测出实际天气背景下米级分辨率的街巷气象场分布。

本文采用的具体方案为:CFD 模型选用 PHOENICS,中尺度模式选择我国数值预报创新中心研制的 GRAPES 模式,其分辨率取 1km。通过中尺度模式与 CFD 模型相结合的方法,实现对街巷气象场的模拟和预测。

1.2 采用的资料和研究对象

在以往的研究中,CFD 计算的边界条件是在试验对象的四周边界取相同的值,或者只是规定了入口边界,出口边界是由模型自动推算得到,本文将中尺度天气模式与计算流体力学模型嵌套,边界值随时空变化,这样可以使 CFD 计算的限定条件更加符合实际情况,结果更加真实。为讨论简单,我们取试验对象如图 1 左图所示,只考虑了一栋建筑物的影响,计算范围为 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 50\text{m}$,划分为 $40 \times 40 \times 20$ 个网格,分辨率为 2.5m;考虑速度在水平和垂直方向的变化,取中尺度模式的结果作为边界条件,即在 GRAPES 模式结果的基础上进行插值,得到图 1 (右) 中对应四个顶点 10m (表 1)

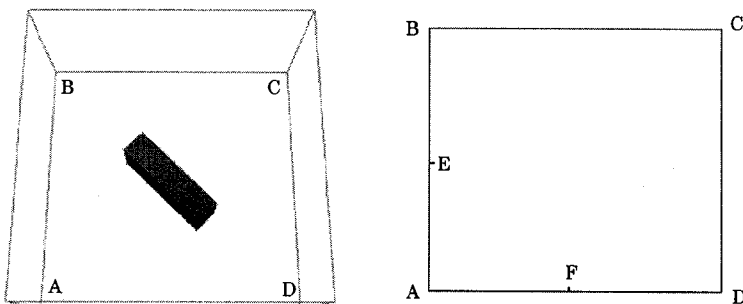


图 1 CFD 计算区域 (左) 及其与中尺度模式嵌套示意 (右)
A、B、C、D 分别是 CFD 计算区域的 4 个角点, E、F 是 AB、AD 中点

表 1 根据 GRAPES 模式结果, 点 A、B、C、D 的 u 、 v 值 (10m)

网格	分量	时次			
		01	02	03	04
A	u	2.2	1.0	1.7	2.0
	v	-1.0	-1.4	-0.8	-1.0
B	u	2.8	2.8	2.4	2.6
	v	0.5	-0.7	-0.6	1.2
C	u	2.6	1.8	1.3	0.8
	v	1.0	-1.5	0.9	1.5
D	u	2.1	0.2	0.00	-0.6
	v	1.8	1.2	0.8	1.8

和 40m (表略) 高度的风速分量 u 、 v 值。我们采用商业 CFD 软件 PHOENICS 3.6.1 版本进行计算。

1.3 边值的敏感性分析

为说明 CFD 模型与中尺度模式嵌套的重要性, 我们设定以下 3 种不同边界嵌套方案进行计算比较:

(1) 边界给定理想状态, 对流入区域给定一个均一的边界条件, 也就是在表 1 的数据中选择点 A 的 u 、 v 作为计算区域的边界条件, 由资料可知, 对计算区域而言, 仅仅设定边界 AB 和 BC 的流入场 (10m 和 40m 分别), 这是以往常采用的方案。

(2) 根据中尺度模式结果, 给边界不同

区域取不同的风速, 为计算简便, 我们将每侧边界每层分为两段, 分别给定边值, 如图 1b, E、F 分别是 AB、AD 的中点, 对于边界 AB, 设定 AE 的值为点 A 的值, 而 EB 设定为点 B 的值 (10m 和 40m 分别)。

图 2 给出了 2 种不同边界嵌套方案下第一个时次的计算流场, 可以看出不同方案的计算流场差异巨大。方案一中背景场均一, 计算出的流场形势简单。而方案二的结果中包含了许多与实际天气背景相协调的流动信息, 更为真实合理。即方案一不能很好地反映实际天气背景下街区要素的分布特征, 因此这一方案不适合于实际天气条件下街巷气象要素的模拟预测。大量对比分析表明, 采用类似方案二的细致的边界嵌套方案对实际天气背景下的 CFD 计算来说是非常必要和重要的。本文用公里级分辨率的数值天气预报模式的计算结果来为 CFD 模型提供随时空变化的边界条件, 试验结果表明方案合理可行。进一步选取计算区域中某些代表点, 定量比较该点不同嵌套方案下风速值随时间变化的差异 (图略), 发现差异可以非常显著, 而且差异情况随时间而变。即计算结果对边界嵌套方案相当敏感, 合理真实的边界方案对获得准确的计算结果非常重要。

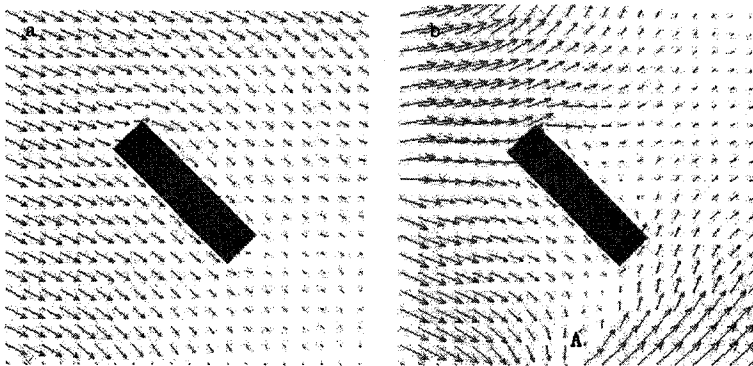


图 2 2 种不同边界嵌套方案在第一个时次的水平流动
a. 方案一; b. 方案二

1.4 CFD 计算的分辨率影响分析

首先分析分辨率对计算耗时的影响。用单机版 PHOENICS 3.6 软件, 不同分辨率(垂直水平都相同, 例如分辨率为 2m 时, 则将试验对象划分为 $50 \times 50 \times 25$ 的网格)下计算耗时如表 2。可见, 随着分辨率的提高, 计算时间增长的速度越来越快。如分辨率为 2m 时所用时间就将近分辨率为 5m 的 25 倍, 因此选择合适的分辨率进行计算对提高计算时效是很重要的。同时, 影响运算时间的另外一大原因就是收敛迭代的次数, 迭代次数和运行时间基本上是呈线性关系, 可以通过调整 CFD 迭代的初值来加快收敛的速度。

表 2 不同分辨率计算所用时间

分辨率/m	2	2.5	5	10
计算时间/s	1268	547	53	7

实际情况中, 计算对象的范围可能比较大, 耗时必然较长, 可以采用多处理器计算。据统计, 采用双 CPU 的计算机进行运算, 速度可以提高 1.8 倍, 而采用 4 个 CPU 的计算机, 速度可以提高 3.2 倍以上。因此, 可以采用 PHOENICS 软件的并行版本进行运算, 达到实用的效果。此外, 也可

以采用区域划分的方法来提高计算时效。

其次分析分辨率对计算的结果影响。图 3 给出了不同分辨率的计算流场, 看到, 不同分辨率下, 其主要的流场形势特征是一致的, 也表明了计算结果的稳定性, 但流场的细致特征有显著的不同。如图 3a (2m 分辨) 中的 A、B 位置有明显的局地环流形成, 而在图 3b (5m 分辨) 则没有明显的环流。这是由于在建筑物的影响下, 其背风区形成了尺度较小的环流, 而 5m 分辨率还不足以显式分辨出这一特征。另外, 如果建筑物的尺度小于分辨率, 那么在计算过程中将不会考虑该建筑物对流场的影响, 这就不会影响计算的精度。因此, 在实际运用中, 要根据要求选择合适的分辨率来进行计算, 兼顾计算精度和计算耗时。

2 计算实例

下面用方案 2, 模拟了一个复杂建筑小区的风场分布。图 4 为计算的不同时次水平流场。可以看出, 在建筑物群的影响下, 背风区风速减小, 且形成局地环流; 而在建筑物之间, 有建筑物阻挡的背风区风速显著减小, 在顺风的街巷形成狭管大风, 在迎风尖角区形成绕流大风等。这些结果符合相应的

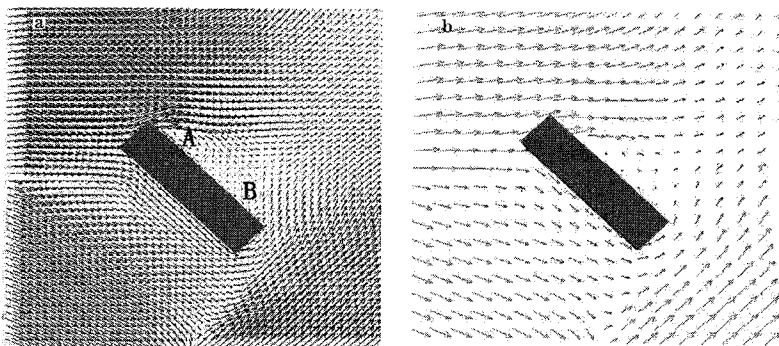


图 3 不同分辨率下的计算流场

a. 分辨率为 2m; b. 分辨率为 5m

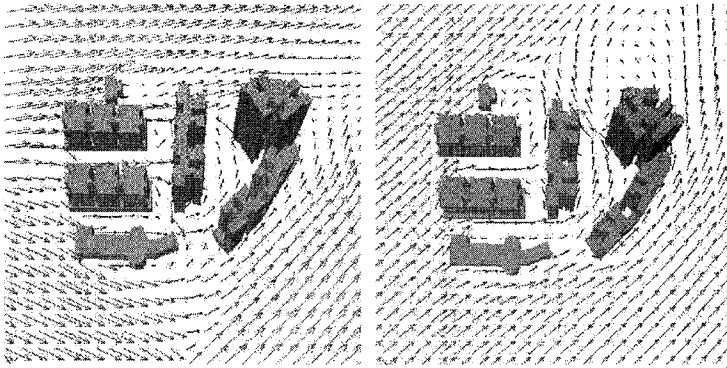


图 4 不同时次的流场
a. 第一个时次；b. 第五个时次

流体力学原理，是合理可信的。从图中可以看出，随着时间变化，边界条件不断变化，建筑物群内的风场也随之变化，局地环流、大风区和静风区的分布形势也随之改变。

同理，以上述计算结果作为驱动条件，还可以进一步计算建筑物内部的气象场分布，如某具体房型内部的流场分布。图 5 为一个计算实例，由图可见，方案细致定量地模拟计算出风通过某房型时内部的流场分布形势，可为建筑设计和专项服务提供依据。

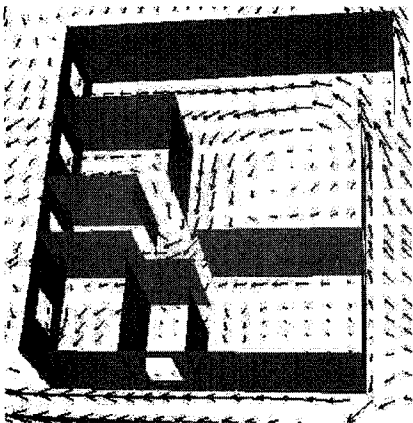


图 5 计算的某房型内部流场分布

3 结论和讨论

本文简要介绍了计算流体力学方法 (CFD) 的原理，提出了应用 CFD 软件与中尺度天气模式嵌套进行街巷气象要素场模拟预测的方案，并讨论了该方法用于街巷气象场计算的可行性。主要结论如下：

(1) 用 CFD 方法进行街巷气象要素场的模拟计算是合理可行的。

(2) 随时空变化的真实合理的边界条件在 CFD 计算中是重要的和必要的。

(3) 用 CFD 模型与中尺度数值天气预报模式嵌套开展街巷气象场的模拟预测是合理可行的。

(4) 该方案具有广阔的应用领域和开发应用前景。

将 CFD 方法与中尺度天气模式相结合，CFD 软件的边界条件可以根据中尺度天气模式的计算结果随着时空变化，使实际天气条件下街巷气象要素场的模拟预测成为可能。因此，计算的准确性很大程度上受到中尺度天气模式精确度的制约，需要不断改进天气模式。

由于实测资料的缺乏及问题的复杂性，目前 CFD 方法还偏重于定性分析，而且需

要选择不同的湍流模型适应不同场合的计算;另外,谢晓敏等^[1]指出日光照射地面对街道峡谷内流场有很大的影响,因此,在 CFD 模型中需要添加辐射模型以增强计算的准确率。PHOENICS 软件提供了增加和修改模型的开放型接口,需要根据目的不断改进和添加相关模块。

本文只是针对流场进行了讨论,实际上 PHOENICS 软件中可以包含气压、温度甚至污染物等多种气象要素,开展更为综合的研究和应用。但需要根据问题做相应的开发和改进。

参考文献

- [1] 钮珍南,杜向东,李长令,等. 体育场内场风环境模拟试验研究 [J]. 空气动力学学报, 1999, 17 (3): 314-320.
- [2] 李会知. 城市建筑风环境的风洞模拟研究 [J]. 华北水利水电学院学报, 1999, 20 (3): 32-34.
- [3] 王勋年,李征初,张大康,等. 建筑物行人高度风环境风洞试验研究 [J]. 流体力学试验与测量, 1999, 13 (1): 54-58.
- [4] Hassan A A, Crowther J M. Modelling of fluid flow and pollutant dispersion in a street canyon [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 52: 281-297.
- [5] Lee I Y, Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in Urban Street Canyons [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28: 2343-2349.
- [6] 张宁,蒋维楣. 城市街渠内气流数值模拟与分析 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2000, 36 (6): 760-772.
- [7] J. Pospisi l, M. Jicha, A. Niachou, M. Santamouris. Computational Modelling of Airflow in Urban Street Canyon and Comparison with Measurements [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2005, 25: 191-200.
- [8] 李磊,胡非,程雪玲等. Fluent 在城市街区大气环境中的一个应用 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21 (4): 476-480.
- [9] 汪立敏,王嘉松,赵宝芹,等. 非孤立街道峡谷大气流动及污染物扩散特征环境科学研究 [J]. 2005, 18 (6): 18-22.
- [10] 闫敬华,戴光丰,陈颖珺. 城域气象精细数值预报——街渠模式的开发研究技术报告 [M]. 国家“十五”重点科技攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”验收报告, 2005.
- [11] 谢晓敏,黄震,王嘉松. 日光照射地面对街道峡谷内流场的影响研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19, Ser. A, (Supp): 865-870.