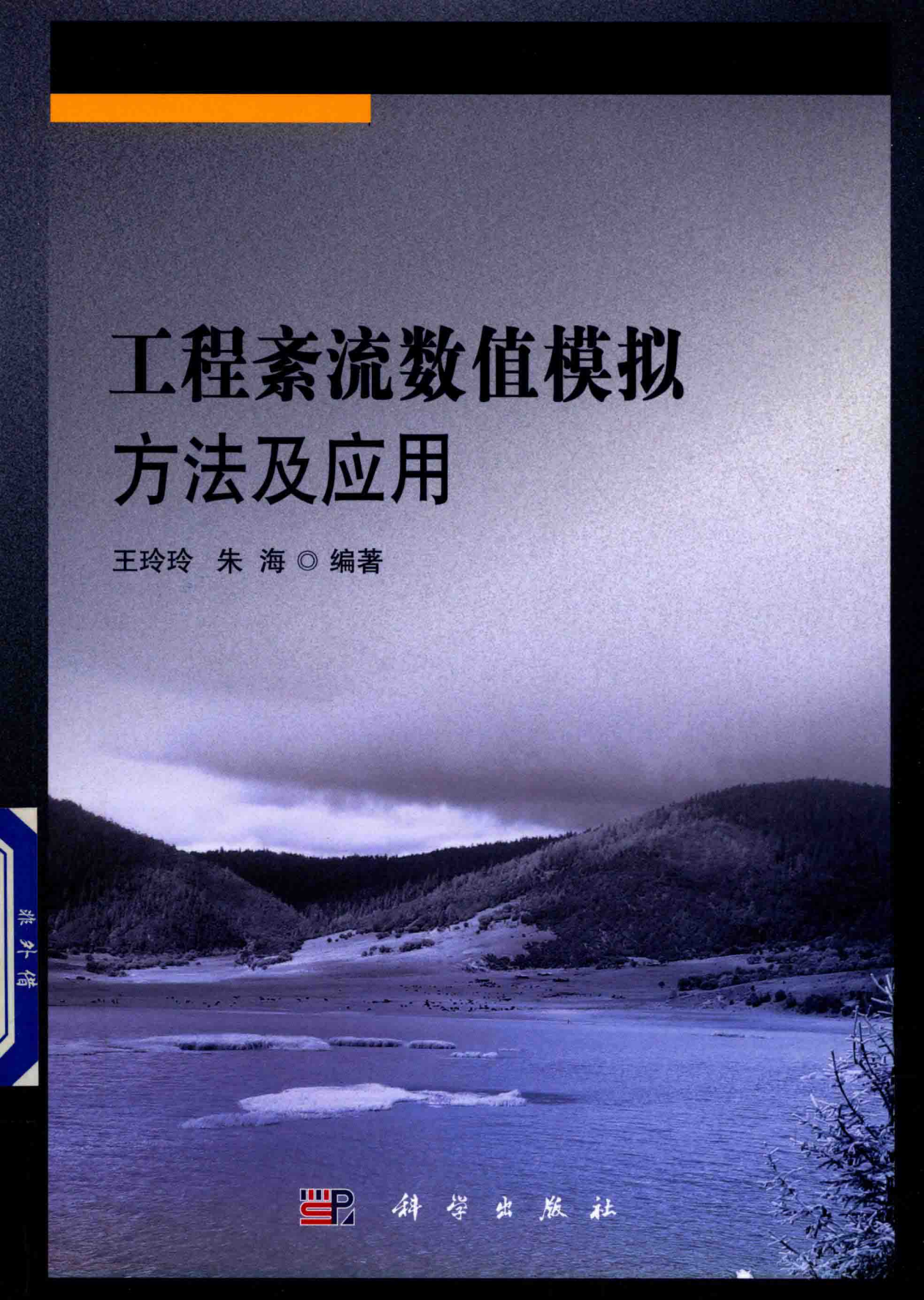




工程紊流数值模拟 方法及应用

王玲玲 朱海 ◎ 编著



科学出版社

工程紊流数值模拟方法及应用

王玲玲 朱 海 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书集作者二十多年教学与科研过程中工程紊流数值模拟方法与应用的研究成果,较为系统地介绍了 Navier-Stokes 方程数值计算方法和紊流模型知识。本书对描述水流和输运现象的通用微分方程的构建及其物理含义、紊流模型理论的发展历史和目前常用的各类模型、有限体积数值方法的基本原理、网格生成技术及 SIMPLE 计算程式进行了系统总结和阐述,由浅入深地介绍了热传导方程、对流-扩散方程以及 Navier-Stokes 方程的数值求解方法,并结合实例介绍了直接数值模拟、大涡模拟和雷诺时均模型在工程紊流模拟中的应用。本书内容完整、严谨,具有重要的学术和工程应用价值。

本书可作为水利、水运、水电、环境工程等专业的研究生教材,也可供从事相关行业的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程紊流数值模拟方法及应用/王玲玲,朱海编著. —北京:科学出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-03-052911-4

I. ①工… II. ①王… ②朱… III. ①水利工程-水流模拟-研究 IV. ①TV135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116848 号

责任编辑:周 炜 罗 娟/ 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 3 月第一次印刷 印张:14

字数:282 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

目前数值模拟方法已成为解决各类工程流体问题最主要的技术手段。数值模拟理论与方法发展迅速,商用流体计算软件也已经普及,工程技术人员及在校研究生都可以借助商用软件对复杂的工程流体及其传热传质问题进行数值试验。学习并掌握工程流体数值计算基本理论与方法,可帮助研究者有针对性地选择计算模型、分析计算结果、提高数值试验精度,在借助商用软件解决工程实际问题时做到“知其然”,也“知其所以然”。因此流体数值模拟技术是相关行业工程技术人员及研究生必须学习的方法。

流体数值计算方法纷繁多样,如有限差分法、有限单元法、有限体积法、边界元法、谱方法以及近年来出现的粒子类方法等。在紊流模型的选择上,除雷诺时均模型外,大涡模拟模型、直接数值模拟及多种混合模型也已逐步应用于解决工程实际问题。作者自 1993 年起为研究生讲授计算水力学及紊流模型课程,深感在各类复杂计算方法大量涌现的今天,广大工程技术人员及在校研究生需要一本清晰阐述数值计算物理含义、基本概念及基础理论与方法的入门性书籍,同时也需要了解快速发展的新的数值计算方法。因此,本书既包括目前常用的各类紊流模型,也包括数值离散方法,并着重介绍了在工程紊流模拟及商用软件中应用最为广泛的有限体积法;在数值方法的介绍中重点强调其基本的物理含义,以及不同网格系统下工程紊流的求解方法;最后结合作者的科研成果,介绍了运用直接数值模拟、大涡模拟及雷诺时均模型方法解决实际问题的应用实例,形成了本书数值计算基础理论、方法与工程应用相结合的结构体系。

本书共 9 章,第 1 章为绪论,第 2 章描述流动问题的控制方程,第 3 章介绍紊流模型及常用的边界条件,第 4 章为离散方法与加权余量法,第 5 章~第 7 章分别介绍结构化网格系统下的热传导方程、对流-扩散方程及 Navier-Stokes 方程的有限体积解法,第 8 章为非结构化网格系统下的通用输运方程有限体积解法,第 9 章分别以温度异重流的雷诺时均方程数值模拟、波流环境下热浮力射流的大涡模拟、槽道异重流直接数值模拟三个应用实例,介绍三种层次的流动模拟方法,并通过算例,介绍分步法、浸没边界方法、多重 σ 网格离散等数值计算技术。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金面上项目(51879086、51479058)、国家自然科学基金青年基金项目(51609068)的支持,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程紊流数值模拟的意义和方法	1
1.2 本书内容	7
第 2 章 水流及其输运现象的数学描述	8
2.1 微分方程的意义	8
2.2 守恒定律	9
2.3 通用微分方程	11
2.4 自变量的选择	12
2.5 单程坐标和双程坐标	13
第 3 章 紊流模型	16
3.1 紊流模拟方法概述	16
3.1.1 紊流的基本性质	16
3.1.2 控制方程的封闭问题	17
3.1.3 紊流模型的基本概念和分类	19
3.2 雷诺时均 Navier-Stokes 方程模型	23
3.2.1 零方程模型	24
3.2.2 单方程模型	28
3.2.3 双方程模型	33
3.2.4 应力-通量方程模型	38
3.2.5 应力-通量代数模型	42
3.3 大涡模拟	44
3.3.1 控制方程及过滤函数	45
3.3.2 Smagorinsky 模型	46
3.3.3 结构函数模型	47
3.3.4 动力亚格子模型	48
3.4 直接数值模拟	49
3.4.1 谱方法	50
3.4.2 高阶有限差分法	50
3.5 定解条件	52

3.5.1	边界的类型	52
3.5.2	固壁边界	52
3.5.3	人流边界和出流边界	54
3.5.4	对称边界条件	55
3.5.5	自由表面边界条件	55
3.6	自由表面数值模拟	55
3.6.1	标高函数法	56
3.6.2	标记网格法	56
3.6.3	流体体积函数法	57
3.6.4	水平集方法	58
第4章	离散方法	60
4.1	加权余量法	60
4.1.1	加权余量法的基本思想	60
4.1.2	子区域法	61
4.1.3	配置法	62
4.1.4	伽辽金法	64
4.1.5	矩法	66
4.1.6	最小二乘法	66
4.2	各类计算方法的比较	67
4.2.1	谱方法和离散方法	67
4.2.2	各类加权余量法的比较	67
4.3	有限体积法	69
4.3.1	有限体积法基本思路	69
4.3.2	有限体积法离散的基本要求	71
第5章	热传导方程的数值解	74
5.1	恒定一维热传导问题	74
5.1.1	网格问题	74
5.1.2	交界面的热传导系数	75
5.1.3	边界条件	77
5.2	非线性问题和源项的线性化	78
5.3	线性代数方程组的求解	80
5.4	非恒定一维热传导问题	81
5.4.1	离散方程	81
5.4.2	显式格式、Crank-Nicolson 格式和全隐格式	83
5.4.3	全隐格式离散方程	84

5.5 非恒定二维、三维热传导问题	85
5.5.1 二维离散方程	85
5.5.2 三维离散方程	86
5.6 线性代数方程组的迭代解	87
5.6.1 Gauss-Seidel 法	87
5.6.2 交替方向隐格式法	88
5.7 超松弛和欠松弛	90
第 6 章 对流-扩散方程的数值解	92
6.1 恒定一维对流-扩散问题和中心差分疑难	92
6.1.1 恒定一维对流-扩散方程的离散	92
6.1.2 中心差分疑难	94
6.2 上风格式和指数格式	95
6.2.1 上风格式	95
6.2.2 指数格式	97
6.3 混合格式和幂函数格式	98
6.3.1 混合格式	98
6.3.2 幂函数格式	100
6.4 各类格式的比较和通用格式	101
6.5 二维通用微分方程的离散方程	104
6.6 三维通用微分方程的离散方程	106
6.7 单程空间坐标和出流边界条件	107
6.8 人为扩散	109
第 7 章 Navier-Stokes 方程的数值解	113
7.1 压力场 ω - ψ 法和原始变量法	113
7.2 交错网格	115
7.2.1 压力梯度项的离散问题	115
7.2.2 连续方程的离散问题	117
7.2.3 交错网格布置方法	118
7.3 压力泊松方程法	120
7.4 压力校正法	122
7.5 压力校正方程 SIMPLE 计算程式	124
7.6 关于压力校正法的讨论	127
7.6.1 关于压力校对方程	127
7.6.2 迭代过程的收敛	127
7.6.3 压力的相对性	128

7.7	改进的 SIMPLE 计算程式	129
7.7.1	问题的提出	129
7.7.2	压力方程	129
7.7.3	SIMPLER 计算程式	130
7.7.4	SIMPLEC 计算程式	131
第 8 章	基于非结构化网格的有限体积法	133
8.1	非结构化网格生成原理和技术	133
8.1.1	非结构化网格	133
8.1.2	非结构化网格生成方法概述	133
8.1.3	非结构化网格特点	134
8.1.4	非结构化网格节点布置	134
8.2	Delaunay 三角形网格生成方法	136
8.2.1	Delaunay 三角化方法	136
8.2.2	初始化三角形	137
8.2.3	Delaunay 三角化方法的实施	138
8.3	同位网格上控制方程的离散与求解	141
8.3.1	结构化同位网格上动量方程的离散	141
8.3.2	非结构化同位网格上对流-扩散方程的离散	144
8.3.3	非结构化同位网格上动量方程的离散	147
8.4	非结构化同位网格上的 SIMPLE 算法	149
8.4.1	压力校正方程的导出	149
8.4.2	非结构化同位网格上 SIMPLE 算法的计算步骤	150
8.4.3	代数方程组的求解	151
第 9 章	Navier-Stokes 方程数值解工程应用实例	153
9.1	三峡水库香溪河库湾水温及水动力特性数值模拟	153
9.1.1	香溪河库湾概况	153
9.1.2	控制方程与数值算法	156
9.1.3	计算区域及网格剖分	159
9.1.4	数值模型验证	160
9.1.5	香溪河库湾水温分布特性	161
9.1.6	香溪河库湾内波数值研究	166
9.2	波流环境下浮力射流大涡模拟	171
9.2.1	大涡模拟动力拟序涡黏模型的建立	172
9.2.2	σ 坐标下的控制方程和分步算法	174
9.2.3	初始条件和边界条件	179

9.2.4	模型及算法的验证·····	182
9.2.5	波流环境下热浮力射流数值试验·····	184
9.3	紊流直接数值模拟模型及应用实例·····	191
9.3.1	控制方程及数值方法·····	192
9.3.2	槽道紊流直接数值模拟·····	197
9.3.3	圆柱绕流直接数值模拟·····	199
9.3.4	开闸式异重流直接数值模拟·····	204
参考文献·····		209

第 1 章 绪 论

1.1 工程紊流数值模拟的意义和方法

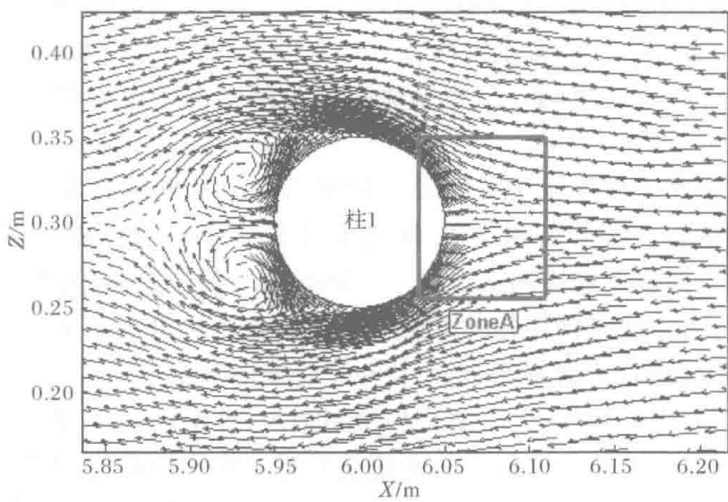
在水利水电、水生态环境及水资源利用等领域,广泛存在着各类水流及其输运问题,其流动空间可大至流域或区域尺度,小至管道、墩柱或排污口近区,空间尺度差异巨大,水动力特征变量大部分具有非恒定性、三维性及随机性,该类流动几乎都属于工程紊流的范畴。工程紊流数值模拟技术已成为解决工程流动问题的主要方法。

本书主要研究工程领域中各种类型的水流现象和伴随着水体流动而发生的热输运和物质输运。为了兴利除害,作为水资源综合利用的第一步,必须探明河流系统中水流运动规律和伴随水流发生的热输运及物质输运规律,进一步模拟和预测水利枢纽、水工建筑物等各种工程措施的实施对河道水流运动、泥沙运动、水质分布等规律的影响,为选择最优的工程方案提供技术支持。为了建设海港、跨海桥梁、隧道或海堤工程等,必须模拟和预测潮汐、波浪的运动规律和海岸演变规律,研究工程建设后泥沙冲淤特性的变化及其对工程安全运行的影响。为了改善水质、防治水污染,必须预测河流、湖泊中的水流规律和污染物的输移规律,以及水利工程调控对水动力和水环境的影响。依据模拟和预测的结果,工程设计人员才能从大量可能的方案中选择最优设计方案;工程管理人员才能安全、有效地运行水工建筑物和水力设备。准确地模拟和预测水流及输运现象还可以帮助我们预警预报乃至控制洪涝、气象、地质等灾害,实现减灾防灾、水资源综合利用等目标。

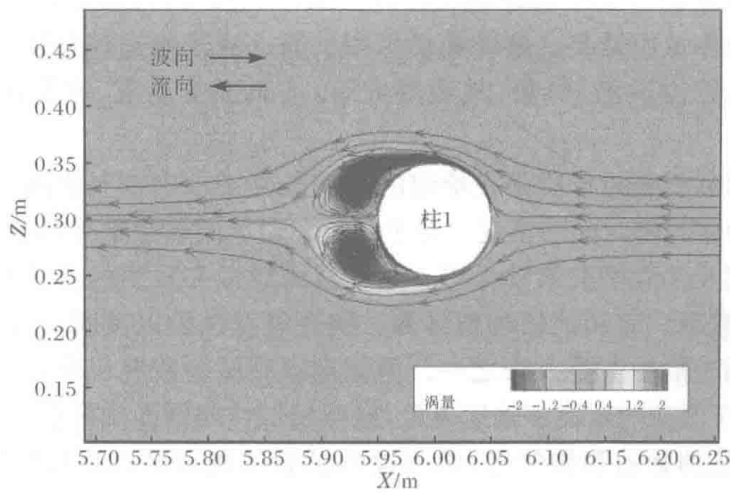
流动模拟和预测的本质是在给定的定解条件下求出控制物理过程的若干变量在空间的分布和随时间的演变。对于水流和输运问题最重要的变量有流速、压强、温度、浓度及其他相关紊动量等。工程紊流模拟和预测的方法基本上可分为两大类:物理模型试验和数值模拟计算。物理模型试验以其所见即所得的“真实感”,成为流动模拟的主要方法之一。但物理模型试验研究也存在一些难以克服的困难:①对于复杂的水流和输运现象,模型相似律问题尚未完全解决,如泥沙的输运、高速水流的脉动和掺气等,因而模型试验的测量结果难以“放大”到原型;②测量仪器的量测精度限制,以及仪器对局部流场、温度场、浓度场的干扰等,使测量结果具有相当的误差。目前实验室常用的粒子图像测速仪等设备利用激光

技术可以实现无接触测量,但由于其测量范围小,难以进行大范围三维测量,同时测量仪器价格昂贵,维护维修困难,使粒子图像测速仪等先进的设备在解决工程流动问题时受到较大的限制。

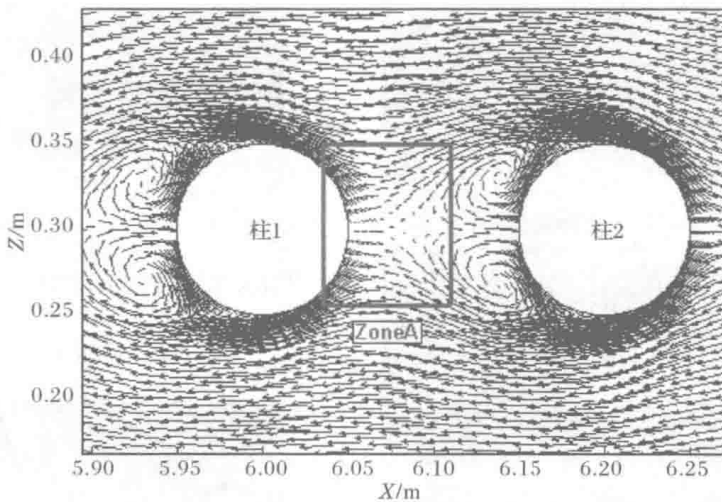
目前,数值计算方法发展迅速,采用数值模拟方法既可以获得大区域的流动细节,也可以获得小范围的精细紊动结构,因此逐渐成为解决工程实际流动问题和进行科学研究的最有力手段。图 1.1 所示为采用大涡模拟方法获得的密度分层流环境中直立圆柱周围非恒定速度矢量场及涡量场,图中显示出柱体迎流面区域流场结构的显著差异,据此可比较单柱与双柱的受力特征和双柱间距的变化对流场的影响,进一步获得各类流动环境中柱体的受力规律。图 1.2 所示为采用直



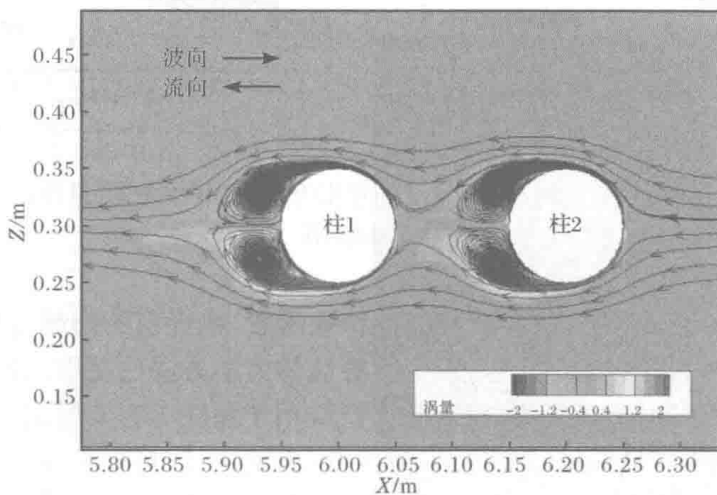
(a) 单柱流速矢量场(单位:m/s)



(b) 单柱涡量场(单位:1/s)



(c) 双柱流速矢量场(单位:m/s)



(d) 双柱涡量场(单位:1/s)

图 1.1 分层流环境中直立圆柱周围非恒定速度矢量场和涡量场

接数值模拟方法得到的内孤立波与不规则地形相互作用所致近边界波破碎所产生的强紊动流场,可用于研究内孤立波的传输、混合及造床特性。图 1.3 所示为波浪作用下热浮力射流(温排放)所形成的非恒定流速场及温度场,进一步可分析出热浮力射流与环境流体的掺混、卷吸特性及其影响范围、影响程度,为工程温排放的环境影响评估提供依据。这 3 种情况都是模拟和预测工程紊流及其传热传质现象的典型实例。

水流和输运现象的运动规律通常由一组微分方程描述。在计算机广泛使用之前,人们采用数学方法求解这些微分方程,只能对少量的实际问题得出严密、精

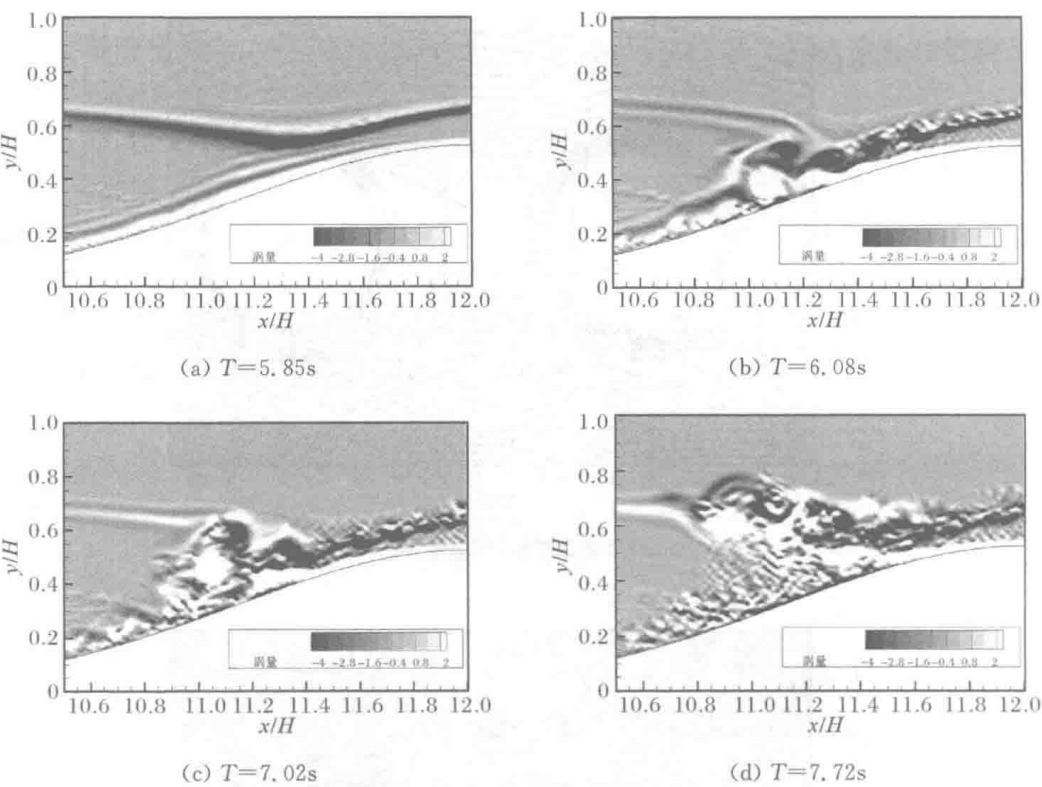


图 1.2 内孤立波与不规则地形相互作用过程中的涡量图(单位:1/s)

H 为槽道水深

确的理论解,这些解往往含有无穷级数、特殊函数、本征值的超越方程,求值极为困难。随着数值计算技术的飞速发展,计算流体力学方法已足以求解绝大多数工程水流和输运现象的数学模型,因而被广泛应用于解决工程实际问题。与物理模型试验相比,数值模拟计算优势显著:费用低、速度快、信息量大且全面、模拟能力强。数值模拟方法只需改变模型计算中的参数就可以很容易地模拟高温、高压、低温、低压、超重、失重等特殊的物理状态。还有一些理想化的物理问题在物理模型试验中无法真正实现,只有在数值模拟计算中才能实现,纯二维水流就是一个最典型的例子。

在图形图像、地理信息技术的支持下,数值模拟也实现了所见即所得。与地理信息相结合,数值模拟成果可以在 Google 地球和工程模型上动态展示。图 1.4 所示为在 Google 地球上展示的 157km 长的淮河入江水道沿程水位的空间分布;图 1.5 所示为南京市秦淮河入江口三汊河双孔护镜门闸闸顶泄流过程中的瞬时流动形态,可以清晰地展示闸顶泄流洪水波向下游推进的过程,直观、逼真、三维性强。当然,数值计算也有其缺点和局限性:数值计算的基础是描述水流和输运现象的数学模型,计算结果的合理性与精度,既取决于计算方法,也取决于数学模

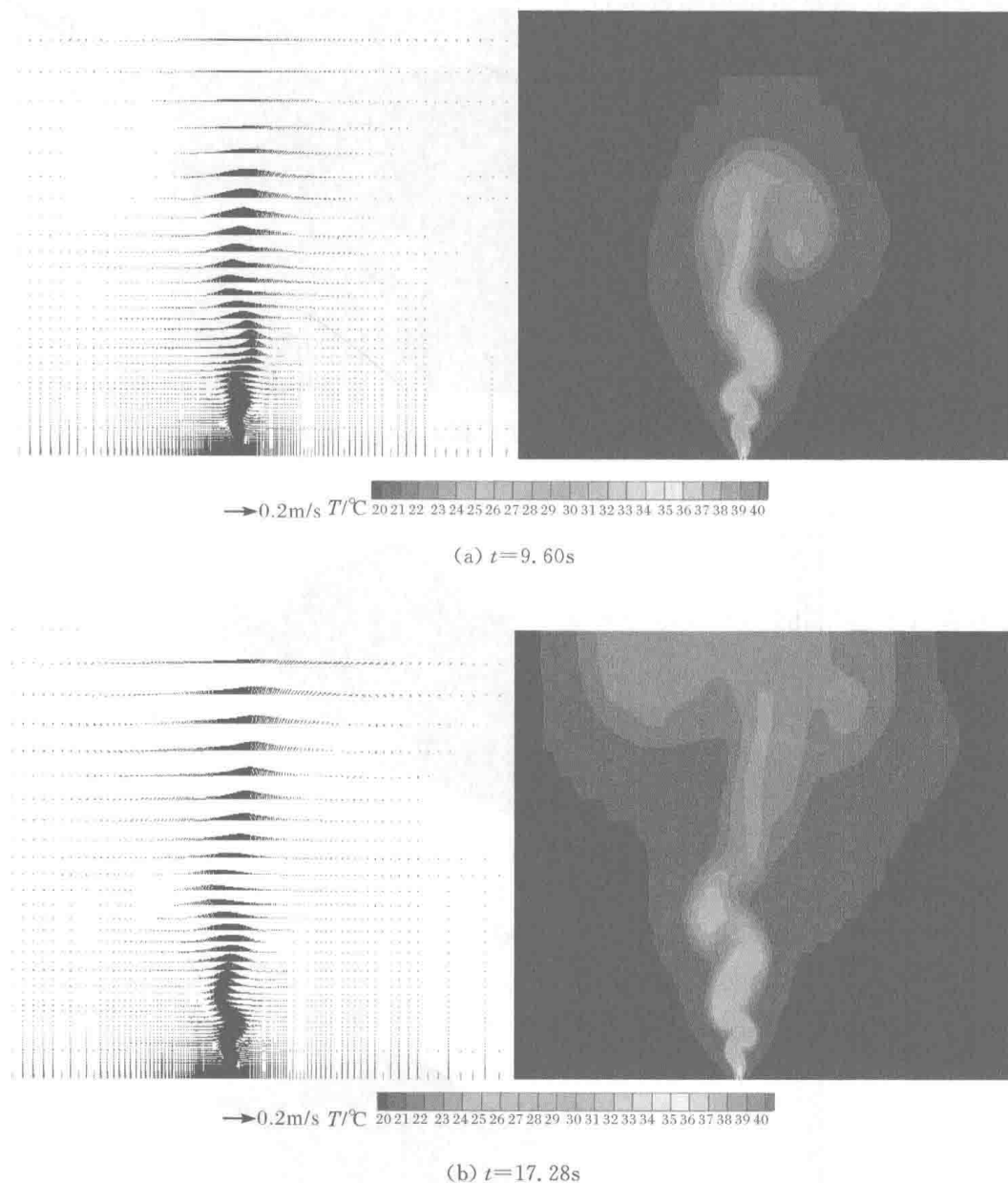


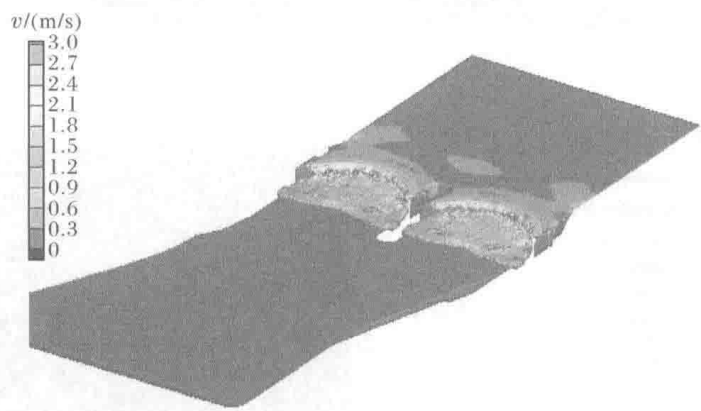
图 1.3 波浪作用下热浮力射流形成的非恒定速度场及温度场

型本身。如果数学模型的描述不够精确、甚至不恰当,最先进的计算技术也会得出毫无价值的结果。例如,采用势流模型无法得出消力岸下游的旋滚;采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型无法得出第二类二次流;采用 Saint-Venant 方程无法得出污染物在近区的对流与扩散过程等。

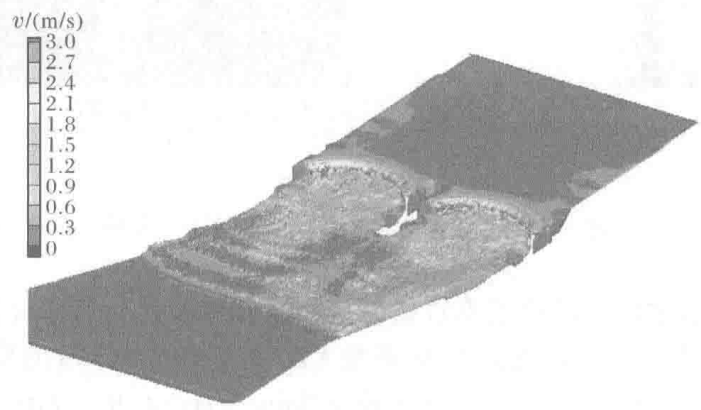
在数值计算技术发展过程中,计算方法起着关键的作用。自 19 世纪 40 年代 Kolmogorov 和 Prandtl 奠定了紊流模型基础后,在快速发展的计算机软、硬件技



图 1.4 淮河入江水道沿程水位的空间分布



(a)



(b)

图 1.5 秦淮河三汊河闸泄洪流态动态过程

术的支持下,各类紊流模型包括大涡模拟模型、直接数值模拟模型得到不断发展,并被逐步应用于解决工程实际问题。目前正在兴起的云技术和并行计算技术,允许研究者运用远程计算模型和高性能计算能力,更使得数值模拟技术的发展日新月异。可以预测,数值模拟将在水流及其输运领域成为科学研究最主要的方法和手段,数值试验也将会在一定程度上取代物理模型试验。

1.2 本书内容

本书较系统地介绍了水流及其输运问题通用数学模型的建立及其求解理论和方法。包括目前常用的主要方法,并以实例展示应用过程,求解实际问题。水流及其输运现象十分复杂,各类现象的控制方程及数值计算方法也名目繁多。要在有限的篇幅中历数各类水流输运现象、数学模型和数值计算方法,几乎是不可能的。本书选择在工程流动模拟及商用软件中应用最为广泛的有限体积法为主要数值方法,着重介绍数值计算格式及其物理内涵和本质,同时也涉及有限差分法、有限单元法等数值方法的相关关系,通过本书的学习,读者可了解工程紊流数值计算的最新进展、常用方法及实用技术。

本书内容力求做到由浅入深和重点突出。本书中所求解的数学方程,由最简单的热传导方程入手,到对流-扩散方程,最后到完整的 Navier-Stokes 方程;紊流模型由零方程模型到单方程模型、双方程模型及其衍生模型(RNG $k-\epsilon$ 、可实现 $k-\epsilon$)、应力-通量方程模型及代数模型,最后介绍大涡模拟模型和直接数值模拟;由恒定一维问题入手,推广到非恒定二维及三维问题,再到典型工程应用实例介绍;数值离散方法以有限体积法为主;空间离散方法以结构化网格为主,也介绍了目前商用软件中常用的非结构网格的生成及其 SIMPLE 程式的实现方法。

学习流体数值模拟方法的目的是为了实际应用。本书第9章通过计算实例分别介绍雷诺时均方程法、大涡模拟方法、直接数值模拟方法在工程和科学研究领域的应用,并通过算例介绍了分步法、浸没边界方法、 σ 网格离散等计算技术。

第2章 水流及其输运现象的数学描述

水流及其输运现象的物理规律可以数学形式偏微分方程来表达,数值模拟方法就是数值求解偏微分方程,给出物理因子在时空域的演化过程和分布规律。

2.1 微分方程的意义

本节以连续方程为例,分析描述水流及其输运现象的微分方程的物理意义和形式特点。

连续方程的矢量式可写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U) = 0 \quad (2.1.1)$$

式中, ρ 为流体的密度; U 为流体运动的速度矢量; t 为时间。对于不可压缩流体,式(2.1.1)简化为

$$\operatorname{div}(\rho U) = 0 \quad (2.1.2)$$

式(2.1.1)的物理意义可表述为:流体密度的增加等于单位体积内流入的净质量。为了说明式(2.1.1)的数学描述和物理意义之间的关系,设 ϕ 表示水流及其输运现象中某种物理量在单位质量流体中的含量,例如,当 ϕ 为 i 方向的速度分量 U_i 时,其物理意义为单位质量流体所含的 i 方向的动量。当 $\phi=1$ 时,表示单位质量流体所含的物质质量,这时式(2.1.1)可写为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\phi U) = 0 \quad (2.1.3)$$

下面将分析式(2.1.3)中各项的意义。考虑图2.1所示各方向大小分别为 dx 、 dy 、 dz 的控制体积,设 J 表示对因变量 ϕ 发生影响的通量, J 在 x 方向的分量即通量 J_x ,表示进入面积 $dydz$ 表面的通量,而离开对立面的通量可表示为 $J_x + (\partial J_x / \partial x)dx$,因而 x 方向的净通量为 $(\partial J_x / \partial x)dx dy dz$ 。同样考虑 y 方向和 z 方向的贡献,并注意到 $dx dy dz$ 恰为所考虑的控制体积,则有

$$\text{单位体积的净通量} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = \operatorname{div} J \quad (2.1.4)$$

可见,散度就是单位体积流体的净通量。这样解释散度的概念,有助于建立有限体积法的数值计算格式。后面将会看到,有限体积法的离散格式就是根据控制体积内因变量的平衡关系得出的。