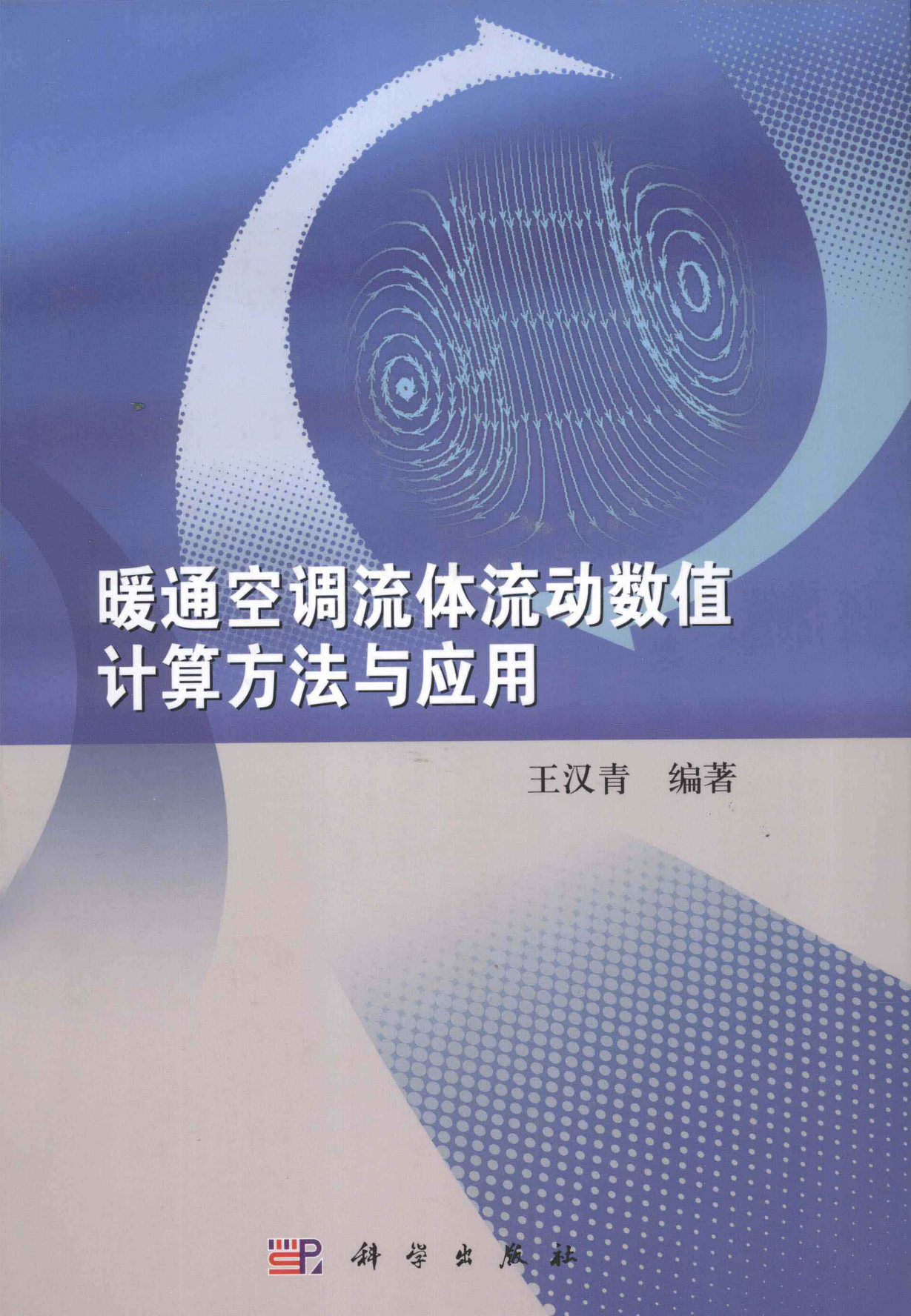




暖通空调流体流动数值 计算方法与应用

王汉青 编著



科学出版社

暖通空调流体流动数值 计算方法与应用

王汉青 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书作者近三十年来一直致力于流体流动与传热传质问题数值计算及其在暖通空调中的应用研究,因此本书不同于一般介绍流体流动与传热数值计算的软件学习指南书。本书既注重暖通空调领域流体流动与传热传质数值计算的基础理论(如数学模型、离散过程、离散格式和算法等),又着重对本应用领域最关键的新型通风方式与传热传质等复杂问题的仿真分析(如分层空调、置换通风、热舒适性、大涡模拟、自然对流、混合通风等),其内容集中体现了基础性、系统性和新颖性。本书第1~6章介绍了流体流动与传热传质问题数值计算所用的数学模型和离散化的基本方法,从二维到三维、层流到紊流,雷诺时均 Navier-Stokes 方程到大涡模拟,推导了相应的数学模型及其离散方程组,并讨论了数值模拟适用的边界条件;第7~12章详细叙述了 CFD 方法在暖通空调工程中的一些重要应用和模型试验方法。

本书可作为暖通、空调、燃气及土木建筑等领域工程师、设计人员、本科生、教师和研究生的参考书,既对理论研究和软件开发有参考价值,又对开展相关领域应用研究有所裨益。

图书在版编目(CIP)数据

暖通空调流体流动数值计算方法与应用/王汉青编著. —北京:科学出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-03-038870-4

I. ①暖… II. ①王… III. ①房屋建筑设备-采暖设备-流体流动-数值计算②房屋建筑设备-通风设备-流体流动-数值计算③房屋建筑设备-空气调节设备-流体流动-数值计算 IV. ①TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 243988 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 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>

北京彩虹伟业印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 10 月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:493 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流体流动无处不在,无时不有。流体流动的本质规律是什么?多年来,这个世界性的难题不知令多少伟大的科学家着迷和激动,以至于付出了毕生的精力。尽管以 Navier-Stokes 方程、雷诺方程和紊流模式理论为标志,人们在理论流体力学方面取得了世纪性的重要进展,但遗憾的是,至今它仍是一个难题。

从 1984 年我考上湖南大学攻读硕士研究生,师从汤广发教授进入数值流体力学在暖通空调中的应用领域开始,至今已近 30 年。这些年来我深深地被它吸引,如痴如醉,不弃不舍。我忘不了为了调试程序,在计算机机房里度过的日日夜夜,更忘不了在大学宿舍里晚上睡觉时躺在蚊帐里看到丝丝纱线还以为躺在三维差分网格里的感觉。

30 年前,计算流体力学的应用远没有现在这么热门。不但计算机硬件条件极其有限,也没有什么商业软件可供使用,我可能算是最早自行编写上万条语句计算机程序的研究者之一吧。软件如何设计构思,采取什么样的格式和算法等,当时解决这些问题都没有现成的路可走,也没有现成的子程序可以参考,一切都靠自己动脑和动手。调试程序也是件难事。非线性问题求解本来就难,而程序本身的逻辑和数据也需要非常仔细地对待,稍有不慎,会折腾得你莫名其妙。难怪现在许多软件历经打磨还有那么多的 bug,一个个的 bug 都淹没在无形之中等着你去发现与解决,唯一不变的规律就是需要不断地测试并完善程序,并为此付出辛勤的汗水。

进入 21 世纪的今天,计算流体力学已经变成一个解决工程实际问题的有力工具,其与模型试验方法相辅相成,令许多过去解决不了的难题迎刃而解。已经有很好的商业软件进入市场,但大多是国外的。相比美国、英国,我国计算流体力学的研究水平一直滞后,主要原因可能还是基础相对薄弱。如何提高我国计算流体力学技术在工程应用领域特别是暖通空调工程中的应用水平,从而推动计算流体力学在暖通空调工程中应用的进一步发展,应成为研究人员不懈努力的方向。本书的目的也正是如此。

本书从层流到紊流,从稳态到动态,从二维到三维,逐步深入,详细阐述了暖通空调中气流流动的数值解析方法,并针对暖通空调领域许多关键问题,如置换通风、高大空间大涡模拟、通风幕墙、大空间有害物传播机理等问题进行了仿真研究。此外,还简要介绍了为验证数值计算结果所采用的通风模型试验方法和基础理论,本书充分体现了其基础性、系统性和内容的新颖性。

第1~6章简单回顾了计算流体力学的发展历程,总结了数值计算所用的数学模型和数值计算的基本方法,推导了二维、三维、层流和紊流的数学模型及相应的离散方程组,并讨论了数值模拟适用的边界条件;第7~12章详细叙述了计算流体力学在暖通空调工程中的一些重要应用。与其他书籍不同的是,本书既注重基本原理又注重实际应用,较好地反映了作者在计算流体力学应用方面所做的一些工作,希望对本领域的科技工作者有一些参考价值。

几十年的坚守使我有许多感触,我之所以能够坚持下来,特别要感谢我在湖南大学攻读硕士、博士学位时的导师汤广发教授,是他把我带入这一充满挑战而又富有乐趣的研究领域,他悉心的指导和在模型试验方面丰富的经验,使我终生受益。还要感谢日本大阪大学的山口克人教授、丹麦的 Nilsen 教授,他们的研究工作卓有成效,与他们多次的交流给我很多有益的启示。还有湖南大学陈在康教授和早期留学日本的庄达民教授,都给了我许多有益的帮助,在此一并表示感谢。

本书是在研究生授课教案的基础上整理而成的,我的博士及硕士研究生李端茹、郭娟、周慧文、胡建军、王飒枫、杨荣郭、李朝军、康良麒等为书稿做了大量的编辑整理工作,在此表示感谢。

本书得到了国家自然科学基金项目“失重条件下密闭环境人体热舒适机理研究”(51276057)资助,在此表示衷心感谢。

感谢湖南大学的师弟、师妹,他们在攻读学位期间积累了不少宝贵算例,对我撰写本书有很大的参考意义。此外,还要特别感谢我的妻子黄春华、女儿王奕文和其他亲人长期以来对我从事计算流体力学研究工作的理解与鼓励。

衷心希望本书能够对有志于计算流体力学应用推广和理论研究的同行提供一些参考和帮助,既能起到推动计算流体力学基础研究以增强发展后劲的作用,又能对扎扎实实解决实际问题有所裨益,这是撰写本书最大的心愿。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年5月

符 号 表

主要变量

$u、v、w$	分别为 $x、y、z$ 三方向的分速度, $m \cdot s^{-1}$
u_i	i 方向的速度(i 代表三个坐标方向), $m \cdot s^{-1}$
k	紊流能量, $m^2 \cdot s^{-2}$
ϵ	紊流黏性耗散率, $m^2 \cdot s^{-3}$
p	压力, Pa
p'	压力修正值, Pa
p_{a0}	相对压力, Pa
T	温度, K
c	污染物浓度, $g \cdot m^{-3}$
ϕ	代表 $u、v、w、k、\epsilon、T、p$ 中任一个变量
ψ	流函数, $m^2 \cdot s^{-1}$
ω	涡度, s^{-1}
τ	时间, s
$\Delta\tau$	时间步长, s
Θ	热函数
Ω	质函数
q_T	流体内部热源的单位体积发热量, $W \cdot m^{-3}$
q_c	单位时间单位体积所产生的气体量, $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
q_w	壁面热流密度, $W \cdot m^{-2}$
τ_t	雷诺应力, Pa
P_{ij}	雷诺应力方程剪应力产生项
G_{ij}	雷诺应力方程浮力产生项
F_{ij}	雷诺应力方程系统旋转产生项

ϵ_{ij}	雷诺应力方程黏性耗散项
Φ_{ij}	雷诺应力方程压力产生项
C_{ij}	雷诺应力方程对流项
$D_{T,ij}$	雷诺应力方程紊流扩散项
$D_{\tau,ij}$	雷诺应力方程分子黏性扩散项
J	某量通过控制容积面的流量密度
$B_{i,j,k}$	压力修正方程的源项
S	方程的源项
$\bar{S}_{ij}$	流体微团应变率张量
Δ	滤波宽度, m
y_T^*	无因次热边界底层厚度
y^+	距离(量纲为 1)
T_s	标准温度, K
T_0	基准温度, K
T_w, T_B	壁面温度, K
ΔT_0	送风温之差, 定性温度, K
L_0, l_0	定性长度或进口当量直径, m
U_0	送风速度或定性速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	x, y, z 三方向的步长

物性参数及常量

ρ	密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
γ	容重, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
g	重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
K_c	温度扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D	质量扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
β	体积膨胀系数, K^{-1}
ν	运动黏性系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
μ	动力黏性系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

ν_t	紊流动力黏性系数, 亚格子尺度紊流黏性系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
ν_{eff}	紊流有效黏性系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K_t	紊流扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Γ	扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\Gamma_{k,\text{eff}}$	紊流能量 k 的有效扩散系数
$\Gamma_{\epsilon,\text{eff}}$	ϵ 的有效紊流扩散系数
D_{eff}	浓度有效扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K_{eff}	温度有效扩散系数
α_S	亚格子热扩散系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
μ_t	亚格子尺度紊流黏性系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
c_p	比定压热容
α	松弛因子, 对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
λ	导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
C_S	Smagorinsky 常数

定性准则

Ar	阿基米德数
Bi	毕渥数
Eu	欧拉数
Fr	傅里叶数
Fr	弗劳德数
Gr	格拉晓夫数
La	拉格朗日准则数
Ma	马赫数
Pr	普朗特数
Pr_t	紊流普朗特数
Pe	贝克来数
Re	雷诺数
Sc	施密特数
Le	路易斯数
Ra	瑞利数

Nu	努塞尔数
Sh	舍伍德数

方程系数

a_E, a_W, a_N, a_S, a_P	P 点和其前后、左右相邻四点方程的系数
$A_E^u, A_W^u, A_N^u, A_S^u, A_T^u, A_B^u$	$u_{i,j,k}$ 左右、前后、上下相邻六点的系数
$A_E^v, A_W^v, A_N^v, A_S^v, A_T^v, A_B^v$	$v_{i,j,k}$ 左右、前后、上下相邻六点的系数
$A_E^w, A_W^w, A_N^w, A_S^w, A_T^w, A_B^w$	$w_{i,j,k}$ 左右、前后、上下相邻六点的系数
$D_e, D_s, D_w, D_n, D_t, D_b$	在控制容积 e, s, w, n, t, b 处的扩散项
$F_e, F_s, F_w, F_n, F_t, F_b$	在控制容积 e, s, w, n 处的对流项
$\sum A_e^u, \sum A_w^u$	e, w 点相邻的左右、前后、上下六点的 u 方程系数之和
$\sum A_n^v, \sum A_s^v$	n, s 点相邻的左右、前后、上下六点的 v 方程系数之和
$\sum A_t^w, \sum A_b^w$	t, b 点相邻的左右、前后、上下六点的 w 方程系数之和
$\sigma_\mu, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_T, \sigma_p, \sigma_c, C_\mu$	紊流模型常数
$c_D, \alpha_k, \alpha_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \eta_0$	模型常数
f_μ, f_1, f_2	低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型阻力系数

下标及算子

w, e, n, s, b, t	离散控制体各节点
W, E, N, S, B, T	离散控制体中心节点
i, j, k	三个直角坐标
eff	有效
w	壁面
SGS	亚格子
t	紊流
∇	拉普拉斯算子
$H(x)$	亥氏算子函数
δ_{ij}	克罗内克算子

目 录

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 CFD 发展历程	1
1.1.1 开创时期	1
1.1.2 飞速发展时期	2
1.1.3 不断丰富和完善时期	2
1.2 CFD 与其他研究方法之间的关系	3
1.3 CFD 在建筑环境与设备工程中的应用	4
1.3.1 概述	4
1.3.2 CFD 在建筑内气流组织和热湿环境分析中的应用	5
1.3.3 CFD 在建筑外风环境及特殊构筑物风荷载分析中的应用	6
1.3.4 CFD 在建筑设备或特殊空间内传热传质分析中的应用	7
1.3.5 CFD 在新型通风方式及人体热舒适状况分析中的应用	8
1.4 仿真过程	9
1.5 CFD 软件的基本组成	10
1.5.1 前处理器	10
1.5.2 求解器	10
1.5.3 后处理器	11
参考文献	11
第 2 章 描述气流运动的数学模型	14
2.1 层流流动模型	14
2.1.1 Navier-Stokes 方程	14
2.1.2 连续性方程	16
2.1.3 能量方程(温度方程)	16
2.1.4 浓度方程	16
2.2 紊流流动模型($k-\epsilon$ 模型、 $k-l$ 模型)	16
2.2.1 连续性方程	17
2.2.2 雷诺方程	17
2.2.3 紊流流动的能量方程	20

2.2.4	紊流流动能量的黏性耗散率 ϵ 的传递方程	22
2.2.5	紊流流动的能量方程	23
2.2.6	浓度方程	24
2.3	其他紊流模型	25
2.3.1	重整化群模型	25
2.3.2	直接数值模拟(DNS)模型	26
2.3.3	雷诺应力模型	27
2.4	二维层流 ψ - ω 法	30
2.5	二维紊流 ψ - ω 法	31
2.6	方程组的无因次化	33
2.6.1	层流 p - v 法的无因次方程组	33
2.6.2	紊流 p - v 法的无因次方程组	35
2.6.3	二维层流 ψ - ω 法的无因次方程组	36
2.6.4	二维紊流 ψ - ω 法的无因次方程组	36
2.7	流体的性质与无因次准则对流体流动的影响	37
2.7.1	流体的物性参数	37
2.7.2	流体流动的无因次准则	41
2.8	偏微分方程的特殊类型	42
2.8.1	椭圆型方程	42
2.8.2	双曲型方程	43
2.8.3	抛物型方程	44
	参考文献	45
第3章	流体流动控制方程组的离散化方法	46
3.1	离散化的基本知识	46
3.1.1	离散化的概念	46
3.1.2	离散化的目的	46
3.2	有限差分的基本方法	46
3.2.1	泰勒级数法	47
3.2.2	多项式拟合法	48
3.3	控制容积法	49
3.3.1	一维对流扩散问题的精确解	49
3.3.2	中心差分格式	50
3.3.3	上风格式	52
3.3.4	幂函数差分格式	53
3.3.5	混合差分格式	53

3.3.6 各种格式的比较	55
3.4 差分方程的迭代求解法	56
3.4.1 逐点松弛法	56
3.4.2 逐线松弛法	56
3.4.3 交替方向隐式法	57
3.5 差分方程组的求解步骤	58
3.5.1 SIMPLE 算法	58
3.5.2 SIMPLER 求解差分方程组的一般步骤	60
3.6 计算网格的划分方法	62
3.6.1 多层网格法简介	62
3.6.2 交错网格	62
3.7 阻碍物的考虑方法	63
3.8 差分方程的收敛性	64
3.9 差分方程的稳定性	64
3.10 气流数值计算可视化软件开发实例	65
3.10.1 气流数值计算可视化的发展及现状	65
3.10.2 开发语言的选择	67
3.10.3 程序的菜单控制	68
3.10.4 子程序功能	72
参考文献	73
第 4 章 二维流体流动数学模型的离散化	74
4.1 用差分法计算二维层流问题的离散化方程组	74
4.1.1 基础方程	74
4.1.2 用差分法推导基础方程的离散方程组	77
4.1.3 压力的修正及压力修正方程的推导	82
4.2 二维紊流数值计算的离散化方程组	82
4.2.1 二维紊流数学模型的建立	83
4.2.2 二维紊流偏微分方程组的离散化	85
4.3 用有限元法计算二维层流问题(ψ - ω 法)	91
4.3.1 基础方程式及边界条件	91
4.3.2 有限元解析	93
4.3.3 FEM 方程组的求解	94
4.4 用差分法计算二维层流问题的 ψ - ω 法	96
4.4.1 二维层流问题的 ψ - ω 法的数学模型	96
4.4.2 方程组的离散	96

4.4.3 固定壁面上的边界条件	100
参考文献	101
第5章 三维流体流动数学模型的离散化	102
5.1 三维定常层流模型的离散方程	103
5.1.1 基础方程式	103
5.1.2 基础方程式的差分方法	103
5.2 三维定常紊流模型的离散方程	107
5.3 三维非定常问题数学模型的离散方法	113
5.3.1 描述三维非定常问题的数学模型	113
5.3.2 微分方程的无因次化	114
5.3.3 基础方程的差分方法	116
5.4 非定常问题的计算过程和压力边界条件	133
5.4.1 压力边界条件	133
5.4.2 差分方程组求解过程的几个问题	133
5.4.3 三维非稳态室内紊流数值计算过程	135
5.5 使用非定常模型计算通风房间通风效率	136
5.5.1 通风效率	136
5.5.2 三维非定常流动中通风效率的计算方法	138
参考文献	141
第6章 边界条件	142
6.1 入口边界条件	143
6.1.1 速度入口边界	144
6.1.2 质量流量入口边界	144
6.1.3 压力入口边界	145
6.1.4 进气口边界	146
6.1.5 进气扇边界	146
6.2 出口边界条件	146
6.2.1 局部单向化边界条件	146
6.2.2 充分发展的边界条件	146
6.2.3 出口非单向性边界条件	149
6.2.4 压力出口边界条件	150
6.2.5 压力远场边界	151
6.2.6 自由出流边界	151
6.2.7 排风口边界	151
6.2.8 排气扇边界	152

6.3 对称边界条件	152
6.4 壁面边界条件及壁面函数法	152
6.4.1 壁面无滑移边界条件	152
6.4.2 壁面函数法	154
6.5 压力边界条件	160
6.6 室内流入口模型	161
6.7 周期性边界条件	162
参考文献	162
第7章 二维室内气流流动问题	164
7.1 二维层流室内气流数值计算——工业厂房自然对流问题	164
7.1.1 计算对象描述	164
7.1.2 边界条件	165
7.1.3 计算过程	165
7.1.4 计算结果分析	165
7.2 质线与热线	169
7.3 二维紊流数值计算——大型水电厂房机械通风问题	172
7.3.1 边界条件	172
7.3.2 差分方程组的求解方法及程序的说明	173
7.3.3 计算结果及其分析	174
7.4 用有限元法计算二维室内气流流动实例	176
7.4.1 室内形状及网格划分	176
7.4.2 边界条件	177
7.4.3 计算结果	178
7.4.4 流函数涡度法的差分计算实例	181
参考文献	188
第8章 三维室内气流流动问题	189
8.1 三维层流数值计算——仪器室顶送下回混合通风问题	189
8.1.1 问题描述	189
8.1.2 边界条件	190
8.1.3 结果分析	191
8.2 三维紊流数值计算——大型水电站厂房机械通风问题	195
8.2.1 问题描述	195
8.2.2 边界条件	195
8.2.3 结果分析	196
8.3 三维室内气流非正常问题的数值计算——侧送侧回机械 通风问题	199

8.3.1 计算对象及边界条件	200
8.3.2 计算结果	200
8.3.3 计算结果与试验结果对比	205
8.4 空调房间空气龄及换气效率分析	208
8.4.1 研究房间气流分布问题的意义	208
8.4.2 基于非定常模型的换气效率问题算例	209
8.5 三维非定常室内自然对流问题计算	216
8.5.1 三维非定常室内自然对流问题的数值计算	216
8.5.2 数值计算结果	217
8.6 热舒适性分析	219
8.6.1 概念	219
8.6.2 影响热舒适的基本参数	219
8.6.3 热舒适评价概念的回顾	221
8.6.4 常用热舒适指标	223
8.6.5 热舒适性指标的数值模拟实例	225
8.7 人体动态热舒适评价	232
8.7.1 现有评价概念的不足之处	232
8.7.2 空调动态热舒适评价体系	233
8.7.3 热舒适参数值分布	236
参考文献	239
第9章 有害物传播的数值计算	240
9.1 浓度分布模型	240
9.1.1 连续性方程	240
9.1.2 动量方程	241
9.1.3 能量方程	241
9.1.4 颗粒物组分方程	241
9.2 室内颗粒物运动的数值模拟	242
9.2.1 数学模型	242
9.2.2 计算对象及边界条件	243
9.2.3 计算工况及计算结果	244
9.3 工业厂房单双侧排风罩性能的数值分析	250
9.3.1 计算对象及其边界条件	251
9.3.2 计算过程及结果分析	252
9.4 复杂山地矿井尾气扩散的数值模拟	260
9.4.1 三维数值地形图的概念及其表示方法	260

9.4.2 计算模型的建立	261
9.4.3 数学模型和边界条件	262
9.4.4 仿真结果与试验的对比	263
参考文献	267
第 10 章 分层空调与置换通风	269
10.1 分层空调与气流分层的规律	269
10.1.1 描述气流分层现象的数学模型	270
10.1.2 分析温度分层的简易方法	271
10.2 上送风形式气流的分层规律探讨	272
10.2.1 计算对象与计算网格	273
10.2.2 边界条件	273
10.2.3 计算结果与分析	273
10.3 侧送风形式气流分层规律	279
10.3.1 数学模型及边界条件	279
10.3.2 送风角度的影响	280
10.3.3 送风高度的影响	281
10.3.4 试验验证	282
10.4 置换通风	282
10.4.1 置换通风的基本原理	283
10.4.2 置换通风的基本参数要求和评价指标	283
10.4.3 研究对象	284
10.4.4 紊流模型及边界条件	285
10.4.5 计算结果及分析	286
参考文献	288
第 11 章 流固耦合问题计算方法	290
11.1 阻碍物模拟方法	290
11.1.1 阻碍物考虑方法的一般概念	290
11.1.2 流固耦合计算的边界条件及具体实施	291
11.1.3 阻碍物流场网格的划分	293
11.2 水电站厂房气流组织数值模拟	294
11.2.1 数学模型	294
11.2.2 计算对象及其边界条件	294
11.2.3 计算结果	294
11.3 通风墙体问题	298
11.3.1 计算对象及其数学模型	298

11.3.2	数学模型的离散格式	300
11.3.3	边界条件及计算过程	304
11.3.4	计算结果	305
11.4	双层玻璃幕墙问题	307
11.4.1	数学模型	307
11.4.2	计算对象及边界条件	307
11.4.3	计算结果分析	309
	参考文献	311
第 12 章	大涡模拟	312
12.1	大涡模拟的基本原理	312
12.2	大涡模拟的数学模型及其离散格式	313
12.2.1	大涡模拟的滤波函数	313
12.2.2	Navier-Stokes 方程的滤波形式	314
12.2.3	常用亚格子尺度模型	315
12.2.4	LES 控制方程	318
12.2.5	方程的无因次化	319
12.2.6	大涡模型的边界条件	320
12.2.7	大涡模型的离散格式	325
12.3	高大空间多射流等温气流场的大涡数值模拟	330
12.3.1	控制方程组、亚格子模型与数值方法	331
12.3.2	数值模拟结果分析	332
12.3.3	LES 与 RANS 的比较	340
12.4	高大空间多射流非等温气流场的大涡模拟	342
12.4.1	数学模型及亚格子模型	342
12.4.2	大涡模拟结果分析	344
12.5	室内气流大涡模拟的基础性问题分析	350
12.5.1	亚格子模型的比较与选择	351
12.5.2	系数取值的影响	352
12.5.3	空间差分与时间步长	355
12.5.4	大涡模拟的参数选择分析	357
	参考文献	358
第 13 章	室内气流流动的模型试验方法	360
13.1	测量紊流相关量的物理概念	360
13.1.1	转捩	360
13.1.2	紊动能	360