

传热与流动问题的多尺度数值模拟： 方法与应用

陶文铨 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

传热与流动问题的多尺度数值 模拟:方法与应用

陶文铨等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书反映了近二十年来在传热与流动问题数值计算方面的研究进展。全书共 14 章,分为基础篇与应用篇两部分。在基础篇部分,分别就有限容积法的网格生成、对流项离散、边界条件处理与代数方程求解、压力与速度耦合算法、湍流与两相流数值模拟以及并行计算、无网格方法、正交分解方法等方面阐述了数值计算的主要进展,同时较详细地介绍了介观与微观方法(格子-玻尔兹曼方法、直接模拟蒙特卡罗法和分子动力学模拟);在应用篇部分,分别从强化传热技术、换热器设计、新能源开发、高新技术、微细通道流动与传热以及纳米与多孔结构等六方面阐述了各类数值方法的应用。

本书各节所述内容大部分是书稿作者的研究或者实践应用的结果。全书有插图六百余幅,各种数值计算例子一百余个。本书特色在于反映了传热与流动问题、多尺度与跨尺度数值计算的最新进展。

本书可作为能源、动力、化工、航空、冶金等专业的研究生、博士生和相关科技工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传热与流动问题的多尺度数值模拟:方法与应用/陶文铨等著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-023113-0

I. 传… II. 陶… III. 传热-数值模拟 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 152342 号

责任编辑:刘宝莉 陈 捷 闫井夫 / 责任校对:钟 洋
责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 1 月第一次印刷 印张:59 1/4

印数:1—2 000 字数:1 380 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

试验研究、理论分析与数值模拟是进行现代科学研究的三种相辅相成的研究手段。随着计算机硬件技术的飞速发展,数值计算在开展科学研究、开发高新技术和加强国防力量方面的作用不可低估。例如,2005年美国总顾问委员会提出要发展计算科学以确保美国在世界上的竞争能力。

进入 21 世纪以来,世界范围内科学研究的一个重要特点是朝着多物理过程与多尺度的方向发展。数值模拟所涉及的物理过程越来越复杂、几何尺度越来越广,相应的数值方法迅速发展。自然界与工程领域中的许多复杂过程本身涉及的几何尺度常常发生几个数量级的变化。如何进行多尺度物理过程的数值模拟是现代数值计算发展的一个重要方向。

我国高等学校中开设计算传热学课程已经有近三十年的历史,培养了大批能从事数值模拟研究与应用的人才。仅就西安交通大学而言,二十五年中就有两千多位研究生与青年教师接受过这方面的良好训练。在这些人中,许多人继续在国内从事这方面的研究,并取得了瞩目的成就。

为了较为系统地反映二十余年来传热与流动数值计算方法及其应用的发展成就和我国学者所做出的贡献,我们特组织编著了这一专著,旨在为广大受过计算传热学(数值传热学)基本训练的读者提供一本进一步钻研的参考书。

本书有以下五大特点:

第一,本书各节对所涉及的数值方法或者应用领域都力图给读者提供较为详尽的内容,对于每节内容的长短并未做出严格的限制,需长则较长,能短就短。读者可以从本专著中学习到一般图书中没有涉及的数值处理细节或者获得提供细节的有关文献,这对于成功地应用一种数值方法是十分重要的。

第二,本书所论述到的数值方法既有目前工程领域数值计算中广为采用的有限容积法,也有最近一二十年中发展起来的介观与微观方法,同时也介绍了多尺度数值计算的问题,这是目前国内外已经出版各类计算流体力学或者计算传热学书籍中所没有的。

第三,本书还特别注重所开发数值方法在科学研究与工程设计中的应用。对于大多数读者来说,学习数值方法的主要目的是应用它来解决科学研究或者工程技术中的问题。因此本书专门从连续介质方法到介观与微观方法汇总了多个应用案例,既有采用作者自编程序计算的,也有采用商业软件完成的,相信这对于读者也会大有裨益。

第四,本书各节所述的内容多数都是该节作者自己科学研究的心得或成果,有的数值方法就是由该节作者提出来的,因此,无论在问题的提出、方法的论述或者结果的表述等方面都与仅仅是文献综述那样的叙述方式有明显区别,更利于读者掌握。

第五,本书各节由多位学者撰写而成,在这个意义上好似一本论文集,只要具备了关于计算传热和计算流体力学的基本知识,每个专题都可以单独阅读,但是它又不同于一般

的关于某个专题的论文集,因为全书经过精心组织,内容与文字都前后连贯,一气呵成。

笔者不才,曾经先后编著出版了三个层次(学士、硕士与博士)的计算传热学与计算流体力学的教材或参考书,在组织本书的过程中特别注意本书内容与前三本教材间的联系与区别。本书中绝大部分的内容都与笔者的三本教材不相雷同而是其延伸与发展,是关于多尺度数值模拟研究的阶段小结,是继这三个层次教材后关于计算传热学高端应用的专著。本书中各节的作者都曾是西安交通大学数值传热学课程的选修者。他们毕业以后都仍然在各自的岗位上进行计算传热和计算流体力学的科研、教学或新产品的开发,并取得了可喜的成绩,笔者有幸成为他们课程的主讲教师或学位论文的指导教师,深感荣幸和欣慰。感谢他们的大力支持配合,按时完成了高质量的书稿。在本书的联系出版、书稿的组织与编排、出版基金的申请以及交稿过程中的事务联系中,何雅玲教授给予的帮助最多,她承担了几乎全部出版事务工作;西安交通大学能源与动力工程学院热与流体研究中心的李增耀副教授、屈治国副教授、唐桂华副教授和博士研究生吴志根,为汇集各节做了很多的努力;博士研究生丁鹏承担了全部参考文献录著格式的修改和插图的修改工作,为本书的完成提供了巨大的帮助。本书中所涉及的研究成果大都是本书各节作者在有关国内外基金资助下完成的,如我国国家重点基础研究发展计划基金(973项目G2007CB206902)、国家自然科学基金重点项目“传热与流动问题的多尺度、跨尺度数值模拟及实验研究”(50636050)、国家杰出青年科学基金项目“热力系统动态特性”(50425620)等。所有这些受资助的内容都在各个章节中一一做了标注,在此也对各个资助部门一并致谢。此外,特别要感谢中国科学院出版基金委员会对本专著予以资助。

2000年笔者在第三层次的拙作《计算传热学的近代进展》最后一节的末尾中这样写道:“可以预期,随着计算机工业的迅速发展及现代数学物理科学的进步,三种层次(宏观、介观及微观)上的各种数值模拟方法都会在其适用范围内进一步得到完善,使我们对热流科学中各种迁移过程的物理机制及规律能有更深层次的认识,并成为解决现代热流科学与工程技术问题的一种强有力工具”。时隔8年,三个层次的数值模拟方法有如此巨大的发展,并促使了多尺度、跨尺度数值计算的兴起,足以说明数值模拟方法的巨大生命力和发展潜力,也使我们能更有信心预期在再一个8年后的成果将更加灿烂与辉煌。

本书成稿匆匆,作者的学识有限,全书涉及的内容面广,不妥之处在所难免,热诚欢迎广大读者批评指正。

陶文铨

2008年国庆前夕于西安

目 录

前言

第一篇 基础篇

第 1 章 网格生成技术	3
1.1 三维结构化网格生成技术	3
1.1.1 引言	3
1.1.2 三维点控制的代数法结构化网格生成原理	4
1.1.3 三维点控制代数法结构化网格生成原理的实现	8
1.1.4 三维结构化网格生成技术应用举例	10
1.1.5 结论	11
1.2 圆柱坐标系中适体坐标的生成及其应用.....	11
1.2.1 适体坐标简介	12
1.2.2 有限容积法在圆柱轴对称适体坐标中的实施	13
1.2.3 应用举例.....	21
1.2.4 结论	28
1.3 非结构化网格的生成及其上 N-S 方程的求解技术	28
1.3.1 非结构化网格生成	29
1.3.2 非结构化网格上的 SIMPLE 算法	47
参考文献	54
第 2 章 对流项离散格式的构造	60
2.1 SCSD 及 SGSD 格式	60
2.1.1 引言	60
2.1.2 SCSD 格式	61
2.1.3 SGSD 格式	62
2.1.4 SCSD 格式与 SGSD 格式的比较	62
2.1.5 SGSD 格式在多重网格中的有效性和经济性	67
2.1.6 小结	70
2.2 有限容积法中格式构造的一般方法.....	70
2.2.1 引言	70
2.2.2 对流项高阶格式构造的统一公式	71
2.2.3 对流项高精度绝对稳定格式的推导	76
2.2.4 二阶精度差分格式求解特性的分析	80
2.2.5 结论	92

2.3	对称奇阶格式的构造	93
2.3.1	传统的对流项“迎风”差分格式构造思想及离散格式的迁移性	93
2.3.2	“对称”三阶精度格式的推导和求解特性分析	94
2.3.3	“对称奇阶”格式构造理论的提出	109
2.3.4	结论	111
2.4	对流项离散格式有界性研究及有界性准则的改进	111
2.4.1	研究现状	111
2.4.2	GL-CBC 的不足	113
2.4.3	界面插值规则的更严格的限制条件	115
2.4.4	基于上述讨论的新的 CBC 区域	117
2.4.5	与现有的有界组合格式的比较	118
2.4.6	GL-CBC 与新 CBC 之间的数值比较	120
2.4.7	小结	122
2.5	对流项离散格式有界性条件的进一步完善	122
2.5.1	引言	122
2.5.2	通用对流有界性准则	123
2.5.3	有界高精度差分格式的构建条件	126
2.5.4	高分辨率组合格式中的一个问题及其改进措施	133
2.5.5	结论	135
	参考文献	136
第 3 章	压力和速度的耦合算法	139
3.1	一种求解不可压缩流场的全隐算法——CLEAR 算法	140
3.1.1	引言	140
3.1.2	CLEAR 算法基本思想	141
3.1.3	CLEAR 算法的计算步骤	142
3.1.4	第二松弛因子	142
3.1.5	CLEAR 算法和 SIMPLER 算法的比较	142
3.1.6	数值比较条件	143
3.1.7	数值比较算例	143
3.1.8	结论	146
3.2	一种高效稳定的分离式算法——IDEAL 算法	146
3.2.1	引言	146
3.2.2	IDEAL 算法的计算步骤	147
3.2.3	算例比较条件和收敛标准	149
3.2.4	数值比较算例	150
3.2.5	结论	159
3.3	曲线坐标系下同位网格中 SIMPLE 系列算法的发展	159
3.3.1	引言	159

3.3.2	控制方程及其离散	161
3.3.3	算例考核	166
3.3.4	改进算法的收敛性及健壮性	170
3.3.5	结论	171
3.4	SIMPLE 系列算法中压力边界条件的处理	172
3.4.1	引言	172
3.4.2	SIMPLE 方法中静压力边界条件的处理方法	173
3.4.3	压力边界条件的程序实现	175
3.4.4	小结	183
	参考文献	183
第 4 章	边界条件的处理和代数方程的求解	188
4.1	开口区域出口边界条件的处理	188
4.1.1	引言	188
4.1.2	出口存在回流时速度边界处理方法	189
4.1.3	周期性边界条件	191
4.1.4	结论	198
4.2	孤岛问题的数值处理	199
4.2.1	引言	199
4.2.2	孤岛处理方法简介	199
4.2.3	物理问题及数值方法	200
4.2.4	数值结果与实验验证	203
4.3	导热对流表面辐射耦合问题的数值处理	207
4.3.1	辐射表面处于求解区域的内部	207
4.3.2	固体辐射表面为求解区域的边界	209
4.3.3	数值方法的实验验证例子	211
4.4	迭代求解过程中拉格朗日初场插值方法的应用	212
4.4.1	引言	212
4.4.2	数值方法	213
4.4.3	数值试验	216
4.4.4	非结构化网格下初场插值方法的推广	224
4.4.5	结论	224
4.5	Krylov 子空间法在 SIMPLER 算法中的应用研究	225
4.5.1	引言	225
4.5.2	Krylov 子空间法在 SIMPLER 算法中的求解特性分析	225
4.5.3	不同代数方程求解方法收敛速度比较及对算法健壮性的影响分析	229
4.5.4	结论	232
	参考文献	235

第 5 章 湍流与两相流的数值计算	242
5.1 方形截面通道内湍流的大涡模拟	243
5.1.1 引言	243
5.1.2 物理问题及数学描述	244
5.1.3 数值方法	245
5.1.4 程序考核	247
5.1.5 计算结果分析	248
5.1.6 结论	253
5.2 湍流的直接模拟	253
5.2.1 引言	253
5.2.2 控制方程	254
5.2.3 数值方法	256
5.2.4 结果分析与讨论	259
5.2.5 小结	267
5.3 旋转方形截面通道中湍流的直接模拟	267
5.3.1 引言	267
5.3.2 物理模型和数学模型	268
5.3.3 数值计算方法	269
5.3.4 控制方程的离散	270
5.3.5 模型 1 的结果及分析	271
5.3.6 模型 2 的结果及分析	278
5.3.7 结论	284
5.4 非牛顿减阻流动的湍流直接数值模拟	285
5.4.1 引言	285
5.4.2 控制方程及数值计算方法	286
5.4.3 高精度紧致格式	287
5.4.4 ENO 格式和 WENO 格式	291
5.4.5 数值算例及结果分析	294
5.4.6 结论	295
5.5 湍流可压缩分离流的数值研究	295
5.5.1 引言	295
5.5.2 控制方程和数值方法	296
5.5.3 计算结果与讨论	297
5.5.4 结论	310
5.6 VOSET——一种精确高效的界面捕捉方法	310
5.6.1 引言	310
5.6.2 求解流体体积函数	312
5.6.3 Level Set 函数的几何计算方法	313

5.6.4	Level Set 函数的应用	315
5.6.5	预测两相流流场的控制方程与离散格式	316
5.6.6	VOSET 方法的求解步骤	316
5.6.7	计算例题及分析比较	316
5.6.8	结论	321
	参考文献	321
第 6 章	连续介质场模拟计算方法的近代发展	329
6.1	两种并行计算编程模式及其应用	329
6.1.1	引言	329
6.1.2	并行计算的相关要素及概念	330
6.1.3	并行计算的实施及应用	333
6.1.4	结论	341
6.2	无网格方法及其在求解传热问题中的应用	342
6.2.1	无网格方法简介	342
6.2.2	用移动最小二乘构建近似函数	343
6.2.3	配点型无网格 Petrov-Galerkin 方法及其在导热问题中的应用	345
6.2.4	无网格 Petrov-Galerkin 方法在导热和对流-扩散问题中的应用	349
6.2.5	小结	353
6.3	最佳正交分解在流动与传热数值计算中的应用	353
6.3.1	引言	353
6.3.2	POD 的实施过程	354
6.3.3	低阶模型的构建	357
6.3.4	算例	358
	参考文献	364
第 7 章	介观与微观层次的数值模拟方法	369
7.1	格子-玻尔兹曼方法简介	369
7.1.1	引言	369
7.1.2	格子-玻尔兹曼方法的热模型	374
7.1.3	格子-玻尔兹曼方法多块网格处理	377
7.1.4	格子-玻尔兹曼方法的应力场模拟	380
7.1.5	格子-玻尔兹曼方法对微尺度电渗问题的模拟	381
7.1.6	小结	382
7.2	可压缩完全气体流动的格子-玻尔兹曼模型	382
7.2.1	引言	382
7.2.2	用于可压缩流动的耦合双分布函数格子-玻尔兹曼模型	383
7.2.3	关于耦合的双分布函数小结	391

7.3	可压缩格子-玻尔兹曼方法的应用	391
7.3.1	激波管问题的模拟	392
7.3.2	双马赫反射问题的模拟	394
7.3.3	库埃特流的模拟	394
7.3.4	小结	397
7.4	熵格子-玻尔兹曼方法及其应用	397
7.4.1	引言	397
7.4.2	熵格子-玻尔兹曼方法框架的构建	398
7.4.3	Ehrenfest 粗粒化	402
7.4.4	强制正定性方法	402
7.4.5	熵函数	403
7.4.6	优化策略	404
7.4.7	数值实例	404
7.4.8	小结	410
7.5	直接模拟蒙特卡罗方法	410
7.5.1	引言	410
7.5.2	直接模拟蒙特卡罗方法简介	411
7.5.3	DSMC 方法中热流边界处理方法及实施	412
7.5.4	子网格与非结构化网格在 DSMC 方法中的应用	417
7.5.5	结论	420
7.6	分子动力学模拟方法	421
7.6.1	引言	421
7.6.2	分子动力学模拟的实施	421
7.6.3	对模拟结果的处理	425
7.6.4	其他问题	427
	参考文献	428
第 8 章	热流问题的多尺度耦合计算	434
8.1	计算的高效、精确化与多尺度耦合	434
8.2	热流过程多尺度问题的耦合模拟	439
8.2.1	引言	439
8.2.2	多尺度物理过程的建模	440
8.2.3	求解多尺度问题的“分区建模-界面耦合”方法及实例	442
8.2.4	求解多尺度问题的“统一方程整场求解”方法的实例	449
8.2.5	热流过程的多尺度问题模拟的展望	450
8.3	热流系统的多尺度问题的耦合模拟	450
8.3.1	引言	450
8.3.2	系统级数值分析	451
8.3.3	印制板级数值分析	455

8.3.4 元件级数值分析	457
8.3.5 结论	458
参考文献	458

第二篇 应用篇

第9章 强化传热技术的数值研究	465
9.1 数值设计高效开缝翅片的原则	465
9.1.1 引言	465
9.1.2 物理模型	467
9.1.3 数学建模	468
9.1.4 结果与讨论	470
9.1.5 结论	474
9.2 X型开缝翅片传热与流动特性的数值预测	474
9.2.1 引言	474
9.2.2 计算区域的选取及其数学描述	475
9.2.3 流动和传热的数值计算方法	476
9.2.4 计算结果和场协同原理分析	477
9.2.5 结论	479
9.3 辐射状翅片及椭圆管翅片特性的数值模拟	479
9.3.1 引言	479
9.3.2 数学物理建模	480
9.3.3 计算区域与边界条件	480
9.3.4 方程求解	481
9.3.5 结果分析与讨论	481
9.3.6 结论	488
9.4 纵向涡发生器强化翅片传热特性的数值预测	489
9.4.1 引言	489
9.4.2 计算模型及数值方法	491
9.4.3 计算结果及分析	493
9.4.4 结论	498
9.5 钉泡翅片流动与传热的数值模拟	499
9.5.1 引言	499
9.5.2 非正交曲线坐标系中同位网格耦合传热问题计算方法	499
9.5.3 钉泡翅片的数值模拟	506
9.5.4 结论	510
9.6 扭转椭圆管内气体流动与传热特性的数值预测	511
9.6.1 引言	511
9.6.2 物理模型	512

9.6.3	计算模型与数值方法	512
9.6.4	结果与讨论	514
9.6.5	小结	519
9.7	管内螺旋流动对流传热的数值模拟	520
9.7.1	引言	520
9.7.2	物理模型和数学模型	520
9.7.3	离散方法和数值方法	522
9.7.4	计算结果及分析	525
9.7.5	结论	529
9.8	泡沫金属传热特性的数值模拟	529
9.8.1	引言	529
9.8.2	研究现状	530
9.8.3	物理问题	531
9.8.4	计算区域及控制方程	531
9.8.5	数值方法及程序验证	532
9.8.6	结果及分析	532
9.8.7	结论	536
9.9	强化单相对流传热机制的数值分析	536
9.9.1	引言	536
9.9.2	场协同原理从抛物型流动推广到椭圆型的流动	537
9.9.3	表征协同性优劣的指标	538
9.9.4	场协同原理的数值验证	539
9.9.5	速度与温度梯度垂直时流速对换热没有影响的实验验证	543
9.9.6	场协同原理是强化单相对流换热的统一理论	543
9.9.7	应用场协同原理指导强化传热表面的开发	543
9.9.8	结论	544
9.10	多孔砖最佳结构的数值设计	544
9.10.1	物理问题和数学模型	544
9.10.2	数值模拟方法	548
9.10.3	结果分析	551
9.10.4	结论	555
	参考文献	556
第10章	数值方法在换热器设计优化和运行控制中的应用	564
10.1	用数值方法设计管片式散热器	564
10.1.1	引言	564
10.1.2	用数值方法设计管片式散热器的流程	565
10.1.3	数值方法准确性分析	567
10.1.4	典型传热单元所能交换的热量 ϕ_c 的确定	569

10.1.5	管片式散热器的数值优化	572
10.1.6	综合设计	573
10.1.7	数值设计结果	573
10.1.8	结论	573
10.2	多级翅片管换热器的数值设计	574
10.2.1	引言	574
10.2.2	物理模型	574
10.2.3	数学模型	576
10.2.4	结果与讨论	579
10.2.5	结论	582
10.3	空调换热器流路布置的数值研究	582
10.3.1	换热器流路布置问题的提出	582
10.3.2	换热器流路布置研究的发展和现状	583
10.3.3	数值计算方法	584
10.3.4	程序的结构和考核	587
10.3.5	换热器典型流路形式对比	588
10.3.6	换热器流路的改进	592
10.3.7	小管径空调换热器流路设计	595
10.3.8	总结	596
10.4	壳管式换热器的三维数值模拟	597
10.4.1	引言	597
10.4.2	数值研究方法	597
10.4.3	管壳式换热器多孔介质模型介绍及应用	598
10.4.4	商用软件与并行计算在管壳式换热器数值模拟中的应用	613
10.4.5	总结	614
10.5	圆管内 CaSO_4 污垢的数值模拟	614
10.5.1	引言	614
10.5.2	基本守恒方程	615
10.5.3	物理模型及网格划分	616
10.5.4	污垢模型	617
10.5.5	定解条件与计算结果	619
10.5.6	结论	621
10.6	数值方法在变频空调器特性研究中的应用	621
10.6.1	引言	621
10.6.2	数学模型	622
10.6.3	数值模拟与系统仿真	625
10.6.4	数值仿真结果的实验验证	625
10.6.5	结论	627

参考文献	627
第 11 章 数值方法在新能源与清洁能源开发中的应用	631
11.1 固体氧化物电解质燃料电池中的电流、温度、浓度诸场的联立解析	631
11.1.1 引言	631
11.1.2 固体氧化物电解质燃料电池的基本原理及数值求解的目标	632
11.1.3 流体流动、传热、传质及电流传导的耦合数值模型	636
11.1.4 一些计算结果及讨论	642
11.1.5 小结	647
11.2 质子交换膜燃料电池的数值模拟	648
11.2.1 引言	648
11.2.2 PEMFC 的三维两相数学模型简介	649
11.2.3 数值模拟方法	656
11.2.4 数值模拟结果与分析	656
11.2.5 结论	664
11.3 现有质子交换膜燃料电池物理数学模型验证方法探讨	665
11.3.1 引言	665
11.3.2 模型描述	665
11.3.3 计算方法	669
11.3.4 模型验证分析	671
11.3.5 结论	676
11.4 太阳能制氢的数值模拟	676
11.4.1 引言	676
11.4.2 光电化学制氢	677
11.4.3 热化学制氢	677
11.4.4 电化学制氢	681
11.4.5 结论	689
11.5 辐射换热数值计算	689
11.5.1 引言	689
11.5.2 辐射传递方程	691
11.5.3 辐射换热数学模型	692
11.5.4 讨论	701
参考文献	701
第 12 章 高新技术中热流问题的数值计算	715
12.1 脉管制冷机的数值模拟	715
12.1.1 前言	715
12.1.2 基本型脉管制冷机	716
12.1.3 小孔型脉管制冷机	725

12.1.4 结论	731
12.2 热声对流的数值模拟	732
12.2.1 研究背景	732
12.2.2 数学模型及求解方法	733
12.2.3 热声波数值模拟的虚假振荡现象	736
12.2.4 半无限大空间内的热声波数值模拟	741
12.2.5 热声波强化传热的数值模拟	745
12.2.6 结论	748
12.3 用于冷却技术的复杂通道内对流换热特性的研究	749
12.3.1 引言	749
12.3.2 前人工作回顾	752
12.3.3 存在的问题	755
12.3.4 楔形通道换热三维数值模拟	756
12.3.5 扰流柱沿流向叉排布置的流动和换热	759
12.3.6 束腰结构扰流柱对强化传热特性的影响	763
12.3.7 断裂结构扰流柱的流动与换热数值模拟	765
12.3.8 结论	767
12.4 高压大推力液体火箭发动机流动与传热的数值模拟	768
12.4.1 引言	768
12.4.2 问题描述	769
12.4.3 燃气的简化处理及热物性的计算	772
12.4.4 数值方法	773
12.4.5 计算结果分析	774
12.4.6 结论	781
12.5 核聚变包层内金属流体在强梯度磁场作用下流动的直接数值模拟	781
12.5.1 引言	781
12.5.2 守恒格式计算洛伦兹力	782
12.5.3 强梯度磁场作用下的 MHD 流动分析	784
12.5.4 结论	787
12.6 室内空气污染物传播过程数值模拟研究	788
12.6.1 引言	788
12.6.2 房间几何模型和数学描述	788
12.6.3 边界条件和源项处理	789
12.6.4 计算结果与分析	789
12.6.5 结论	793
参考文献	793
第 13 章 微细通道流动与传热的数值研究	805
13.1 细通道电子器件冷却器的数值设计	805

13.1.1	引言	805
13.1.2	细通道模型设计	807
13.1.3	控制方程与边界条件	807
13.1.4	计算方法	808
13.1.5	湍流计算结果	809
13.1.6	层流计算结果	816
13.1.7	结论	818
13.2	微尺度非平衡态气体的格子-玻尔兹曼方法模拟	819
13.2.1	引言	819
13.2.2	微尺度非平衡态气体格子-玻尔兹曼方法求解模型	821
13.2.3	微尺度非平衡态气体格子-玻尔兹曼方法的应用	829
13.2.4	总结	831
13.3	微通道电渗流数值模拟	832
13.3.1	引言	832
13.3.2	电渗流速度控制方程	833
13.3.3	伴随焦耳热的三维电渗流的物理与数学模型	836
13.3.4	数值解法	842
13.3.5	数值模拟结果与分析	843
13.3.6	总结	848
13.4	微通道内气体流动传热特性的 N-S 方程及 DSMC 求解	848
13.4.1	引言	848
13.4.2	气体稀薄性与可压缩性的耦合作用	849
13.4.3	突扩/缩微通道内的流动特性	853
13.4.4	平直微通道传热特性	856
13.4.5	结论	857
13.5	微喷管中传热与流动的耦合跨尺度模拟	857
13.5.1	引言	857
13.5.2	计算方法	858
13.5.3	程序验证	859
13.5.4	FMMR 模拟	860
13.5.5	计算结果及分析	861
13.5.6	结论	865
13.6	计算微流体力学的应用	865
13.6.1	引言	865
13.6.2	计算工具	865
13.6.3	微流体领域中使用 CFD 的几个例子	866
13.6.4	结论	871