

MESH GENERATION TECHNIQUES IN
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

计算流体力学 网格生成技术

■ 张来平 常兴华 赵钟 赫新 著



科学出版社

计算流体力学网格 生成技术

张来平 常兴华 赵 钟 赫 新 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

网格生成技术是计算流体力学 (CFD) 的重要组成部分,也是 CFD 走向工程应用的瓶颈技术。本书对 CFD 网格生成技术进行了比较系统全面的介绍,内容包括:各种数值计算方法对网格的需求,静动态结构网格、非结构网格和混合网格生成技术,网格自适应技术和优化技术,多重网格计算所需的多级粗网格生成技术,并行网格生成及网格分区技术,复杂外形的描述与表面网格生成等,附录还简要介绍了几款常用的商业网格生成软件。鉴于作者的研究领域有限,本书重点介绍了非结构、混合网格生成技术;为了本书的完整性,对结构网格也进行了简要的介绍。本书的内容主要源于作者的研究工作,少部分内容取材于参考文献和同事的论文或报告。

本书主要面向广泛应用 CFD 技术的航空航天领域,可供高等院校和科研单位相关专业的研究生、科技人员参考。对从事计算数学、计算物理等相关领域研究的读者亦有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算流体力学网格生成技术/张来平等著. —北京:科学出版社, 2017.4
ISBN 978-7-03-052315-0

I. ①计… II. ①张… III. ①计算流体力学-网格-研究
IV. ①O35②O243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 052781 号

责任编辑:赵敬伟/责任校对:邹慧卿
责任印制:肖 兴/封面设计:耕者工作室

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16
2017 年 4 月第一次印刷 印张:21 1/2 插页:16
字数:410 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

献给我们的家人
To Our Family

序

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 自 20 世纪 60 年代诞生以来, 经历了从初创起步到蓬勃发展的辉煌历程。尤其是随着现代计算机技术的迅猛发展, CFD 已经成为以航空航天为代表的诸多工业应用领域的设计工具, 并发挥着越来越重要的作用。

我把 CFD 的研究内容概括为五个 “M” 和一个 “A”。五个 “M” 分别是 Machine, Mesh, Method, Mechanism 和 Mapping。Machine, 即计算机, 它是 CFD 研究的硬件基础; Mesh, 即计算网格, 网格划分是整个数值计算的基础和前提; Method, 即计算方法, 这是 CFD 中最为活跃的领域; Mechanism, 即流动机理, CFD 的最终目的是获得飞行器的气动特性和与之相应的流动机理; Mapping, 即流动显示。一个 “A” 指 Application, 即应用, CFD 研究的最终目的是在以航空航天为代表的众多工业领域得到良好的应用, 解决研制中存在的~~关键~~气动问题。CFD 诞生以来, 始终围绕这五个 “M” 和一个 “A” 向前发展, 在发展过程中, 越来越体现出网格生成技术是 CFD 走向工程应用的重要方面, 并且是一个技术瓶颈。

张来平博士 20 世纪 90 年代初开始跟随我从事 CFD 研究。由于他在中国科学技术大学毕业设计中从事的是流体力学有限元计算方法研究, 因此很自然地在攻读硕士学位阶段选定了非结构网格生成技术及相应非结构计算方法作为今后的研究方向。经过硕博阶段的努力, 他建立了有特色的非结构网格和混合网格生成技术, 构造了能自动捕捉激波的无振荡无自由参量耗散差分 (NND) 有限体积算法。在后续的研究中, 又相继发展了动态混合网格生成技术及非定常计算方法、气动/运动/控制耦合的一体化计算方法等。这些方法在复杂飞行器的静、动态气动特性模拟, 多体分离和机动过程的模拟, 以及分离流动机理分析等方面发挥了良好的作用。

张来平博士的这部著作有自己的风格, 他从 CFD 的基本算法出发, 系统地阐述了 CFD 对网格生成技术的要求, 以及他对发展网格生成技术的看法。他从结构网格到非结构网格再到混合网格, 从网格自适应技术到多重网格技术, 从静态网格到动态网格, 从网格生成优化技术到网格生成技术的应用都给出了自己的研究成果。这部著作内容系统严整、图文并茂, 相信能为从事 CFD 研究与应用的工作者提供良好的参考。

我认为网格生成技术经过几十年的发展已取得巨大成功, 国内外已经出版了不少优秀的著作, 但仍需围绕自适应、并行化、自动化、智能化、高精度等方面开

展持续研究。我们期待张来平博士及其带领的研究团队，能在今后的研究工作中取得更多的成果呈现给读者，为计算流体力学学科发展和工程应用做出更大的贡献。

张信

2016 年 7 月于北京

前 言

随着计算机技术的迅猛发展,计算流体力学 (CFD) 已经成为流体力学、空气动力学研究的重要手段,以及航空航天飞行器设计的重要工具。网格生成技术作为 CFD 的重要研究领域,亦已成为 CFD 的重要学科分支,对 CFD 的研究与应用起着至关重要的作用。

作者自 20 世纪 90 年代初开始,有幸跟随我国著名空气动力学家、计算流体力学家张涵信院士开展计算流体力学研究。最先选定的研究方向即为非结构网格生成技术及基于非结构网格的数值计算方法。在学习国内外网格生成技术的基础上,综合各种方法的优势,于 20 世纪 90 年代中期发展了二维/三维非结构网格生成方法。在非结构网格技术基础上,提出了笛卡儿 (Cartesian)/四面体混合网格生成方案。为了模拟复杂黏性流动,随后发展了三棱柱 (物面附近边界层内)/非结构 (过渡区)/Cartesian 网格 (远场) 的混合网格技术。近年来,进一步发展了基于“各向异性”四面体网格聚合的三棱柱网格生成方法,提高了复杂外形边界层内三棱柱网格的生成质量和效率。21 世纪初以来,着眼于运动物体的非定常数值模拟,进一步发展了一种综合弹簧松弛法、Delaunay 背景网格插值法、径向基函数法和局部网格重构法等优势的动态混合网格生成方法。

在网格生成技术的基础上,作者同时开展了高分辨率计算方法研究。先后取得如下进展:①基于张涵信院士提出的无振荡无自由参量耗散差分 (NND) 格式的构造思想,构造了适用于任意网格类型的 NND 有限体积格式。②为了加速收敛,发展了基于混合网格的隐式格式和基于 METIS 的分区并行计算方法,极大地提高了计算效率,使计算方法更加实用化。③通过分析黏性流动特征,发展了基于“各向异性”粗网格聚合的多重网格方法。根据边界层流动特性,限定粗网格聚合的方向为物面法向,由此提高了聚合后的“粗网格”质量;同时发展了一种更为鲁棒的插值算子,提高了多重网格计算的稳定性和收敛性。④基于动态混合网格技术,建立了时空二阶精度的非定常计算方法。提出了一种简便的动网格非定常计算的几何守恒算法;发展了基于双时间步的块 LU-SGS (BLU-SGS) 隐式非定常计算方法。⑤研发了动态混合网格自动生成/非定常流场计算/六自由度运动耦合的一体化计算方法和大规模并行计算软件平台 HyperFLOW,为复杂多体分离轨迹预测和动态气动特性分析提供了有效的分析手段。⑥通过比较有限体积法 (FV) 和间断 Galerkin (DG) 有限元等方法,提出了“静态重构”和“动态重构”的概念,并提出了静动态“混合重构”的思想,构造了一类基于非结构/混合网格的高阶精度 DG/FV

混合格式。以上网格生成技术和计算方法在复杂飞行器气动特性数值模拟和流动机理分析中得到良好的应用。

为了总结二十余年来的研究工作,同时将自己的经验和体会与刚刚踏入计算流体力学研究领域的青年学者分享,作者于 2012 年年初开始筹划本书的编写。为了能使初学者对网格生成技术有一个全面的了解,作者力图对网格生成技术进行全面的介绍,主要内容涉及静动态结构网格、非结构网格和混合网格生成技术,网格自适应技术,多重网格计算的多级粗网格生成技术,并行计算的网格自动分区技术,基于数模的曲线、曲面生成,网格生成商业软件简介等。由于作者的研究领域主要集中于非结构/混合网格,因此本书仅对结构网格进行简要的介绍。本书的主要内容来源于作者的研究工作,其间亦综述了国内外进展,并在最后对网格生成技术进行了展望。

全书共分为 17 章。第 1 章是绪论,简要介绍了 CFD 的作用和地位,并概括介绍了 CFD 网格生成技术的发展历程、CFD 对网格技术的基本要求。由于网格生成技术与计算方法密切相关,为了使读者更好地理解网格生成技术,在第 2 章中简要介绍了 CFD 数值模拟中常用的流动控制方程和主要的计算方法,包括有限差分法、有限体积法和有限元方法。第 3 章至第 5 章简要介绍了结构网格生成技术,其中第 3 章为结构网格生成方法概述,第 4 章为常用的代数网格生成方法,第 5 章则重点介绍了复杂外形的多块结构网格技术,主要包括多块对接和拼接网格技术、重叠网格技术。关于求解微分方程的结构网格生成方法等,由于作者没有开展相关的研究,因此未作介绍。第 6 章至第 9 章重点介绍了非结构网格生成技术,包括方法的概述、阵面推进法、Delaunay 方法、四叉树/八叉树(quadtrees/octrees)方法等,其间还介绍了一些常用的数据结构。第 10 章重点介绍了结构/非结构混合网格生成方法,主要包括各种网格混合策略、层推进方法、基于“各向异性”四面体网格聚合的三棱柱网格生成方法等。第 11 章和第 12 章介绍了网格自适应技术和优化技术,这些技术对于提高网格质量和效率具有重要意义。第 13 章重点介绍了动态网格生成技术。从网格拓扑的角度,分为动态结构网格和动态非结构/混合网格两个部分。在动态结构网格中主要介绍了弹簧松弛法、超限插值法和动态重叠结构网格方法;在动态非结构/混合网格中主要介绍了弹簧松弛法、Delaunay 背景网格映射法、动态重叠网格方法、基于径向基函数的网格变形法以及变形/重构耦合方法等。第 14 章和第 15 章分别介绍了分区并行计算方法和多重网格方法,这些方法对提高计算效率、求解大规模计算问题具有重要意义。第 16 章简要介绍了与网格生成技术密切相关的几何外形定义和物面网格生成技术。第 17 章是本书的总结,对网格生成技术的未来发展趋势进行了探讨,提出了网格生成技术中的若干关键科学问题,并对未来的网格生成技术进行了展望。为了使读者对网格生成软件有所了解,在附录中还简要介绍了几款有代表性的网格生成商业软件。

历时四年有余,本书终于迎来了出版之日。回望这二十余年的科研工作以及本书的编写过程,作者内心真是百感交集!在本书的编写过程中,凝聚了太多人的帮助和关心,作者在此表示深深的感谢!

衷心感谢张涵信院士二十多年来的培养、关怀和帮助!从最初的二维三角形网格生成到三维混合网格思想的提出,从基于非结构网格的 NND 有限体积算法到现在的基于动态混合网格的非定常计算方法,从二阶精度计算软件的成熟应用到高阶精度 DG/FV 混合格式的构造,作者成长的每一步无不凝聚着张涵信院士的心血。他不仅教给作者丰富的科学知识,而且教给作者受用一生的科研方法,并培养了作者作为一名科研工作者所应具备的道德品质。在本书的编写过程中,张涵信院士也给予了细心的指导,并亲自为本书作序。在此,作者谨向他表示崇高的敬意,并致以深深的祝福。

在长期的研究过程中,高树椿研究员曾给予无私的关怀与厚爱,他一丝不苟、精益求精的科研作风使作者受益匪浅。他曾经逐字逐句地修改作者的博士学位论文,甚至连标点符号也不放过。正是他的严格要求使作者养成了严谨求实的科研作风,并将这种品质传递给自己的学生。

感谢已故的庄逢甘院士和崔尔杰院士的长期关心与鼓励!他们一直鼓励作者深入开展网格技术和相关数值模拟方法的研究,并努力应用于复杂飞行器的数值模拟,解决实际的工程问题。感谢童秉纲院士的指导和关怀!他一直鼓励作者将网格技术,尤其是动态混合网格技术和非定常计算方法,应用于复杂流动机理的研究,力争在流体力学的基础理论方面有所建树。正是在这些前辈的指导和鼓励下,作者才能坚守这一研究领域,并取得了一些可喜的进展。

在二十余年的研究过程中,作者亦得到邓小刚、王志坚、叶友达、沈清、耿湘人、刘君、刘伟、袁湘江、毛枚良、黎作武、贺国宏、陈坚强、张树海等众多学长的帮助;吕超、杨永健、贺立新、赫新、王振亚等同学先后参与相关工作;常兴华、段旭鹏、郭秋亭、刘伟、赵钟、李明、张扬、孙杭义、马戎、何先耀、何磊、李泽禹、王年华等学生也对本书的工作做出了重要贡献,书中的很多网格生成实例是由这些学生提供的。特别是与赫新合作完成了基于混合网格的通用流场解算器 HyperFLOW 的研制,常兴华参与完成了第 13 章主要内容的编写,赵钟参与完成了第 10 章、第 12 章和第 15 章的编写,张扬参与完成了第 11 章主要内容的编写。李明和赵钟对全书初稿进行了认真的校对。中国空气动力研究与发展中心及下属的计算空气动力研究所的领导和同事们给予了大力支持和帮助,特别是王运涛、袁先旭、洪俊武、周乃春、肖涵山、陈琦等同志还提供了大量网格生成实例,闵耀兵同志提供了结构网格质量检测方法。协作单位北京荣泰创想科技有限公司的管志勇和乔岳同志提供了网格生成软件 Gridpro 的相关资料。在写作过程中,我们还引用了大量文献中的应用实例。在此一并表示诚挚的感谢!

感谢国家自然科学基金委员会的长期支持! 自 20 世纪 90 年代中期以来, 作者的工作一直得到国家自然科学基金委员会的资助, 作者先后承担或参与的国家自然科学基金重点项目 (19882009、11532016)、集成项目 (91530325)、面上项目 (19772072、10472012、10872023、11272339)、培育项目 (90405014、91016011、91130029)、青年基金项目 (11202227)、创新群体项目 (10321002、10621062) 等十余项。同时感谢国家重点研发计划“数值飞行器原型系统开发”(2016YFB0200700) 的资助。正是在这些项目的支持之下, 作者才能二十余年长期坚守在这一领域开展研究, 也才有机会将研究成果集结成书。

感谢科学出版社的同仁! 在本书的编写过程中, 他们给予了大量的帮助, 是他们卓有成效的编辑工作才使得本书能够顺利出版。

最后, 作者要对家人致以深深的谢意! 在几十年的求学和工作中, 家人给予作者默默的支持。很多时候, 作者因为工作忙碌而没有尽到一个儿子的孝心、一个丈夫的关心和一个父亲的爱心, 而他们却给予了解, 毫无怨言。本书的出版, 算是对他们辛勤付出的一点回报。

感谢所有对作者给予关心和支持的朋友们!

总之, 作者希望对网格生成技术, 尤其是静动态的非结构/混合网格技术, 进行比较全面系统的介绍。但是由于作者水平有限, 对网格生成技术的理解难免有一些偏颇之处, 因此相关内容难免有不当之处, 敬请读者谅解和批评指正。

张来平

2016 年元月于绵阳

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 计算流体力学的重要作用	1
1.2 网格生成技术的发展历程	3
1.3 计算流体力学对计算网格的基本要求	9
1.3.1 网格光滑性要求	10
1.3.2 网格正交性要求	11
1.3.3 网格分布要求	12
1.4 网格生成技术国内研究与应用现状	14
参考文献	15
第 2 章 流动控制方程及计算流体力学计算方法概述	19
2.1 引言	19
2.2 流动控制方程	20
2.2.1 直角坐标下微分形式的雷诺平均 Navier-Stokes 方程	20
2.2.2 贴体曲线坐标下微分形式的雷诺平均 Navier-Stokes 方程	21
2.2.3 直角坐标下积分形式的雷诺平均 Navier-Stokes 方程	23
2.2.4 直角坐标系下运动网格积分形式的雷诺平均 Navier-Stokes 方程	23
2.3 有限差分方法	23
2.3.1 计算格式的构造原则	26
2.3.2 二阶 NND 差分格式	27
2.4 有限体积方法	28
2.4.1 二阶精度 NND 有限体积格式	29
2.4.2 k -exact 高阶精度重构方法	34
2.4.3 ENO 和 WENO 高阶精度重构方法	37
2.5 有限元方法	38
2.5.1 间断 Galerkin 有限元方法	39
2.5.2 基函数的选取	41
2.5.3 黏性项的离散	44
2.6 其他方法	45

2.6.1	有限谱体积方法	46
2.6.2	有限谱差分方法	47
2.6.3	间断 Galerkin 有限元/有限体积混合方法	49
2.7	小结	53
	参考文献	54
第 3 章	结构网格生成方法概述	64
3.1	引言	64
3.2	代数网格生成方法	65
3.3	保角变换网格生成方法	65
3.4	求解微分方程的网格生成方法	66
3.5	复杂外形结构网格生成方法	66
3.6	小结	68
	参考文献	68
第 4 章	结构网格代数生成方法	71
4.1	引言	71
4.2	变换与网格剖分	71
4.3	超限插值方法	72
4.3.1	Boolean 积形式	73
4.3.2	递归形式	74
4.4	超限插值方法的实际应用	74
4.4.1	线性插值	74
4.4.2	Lagrange 插值	75
4.4.3	Hermite 插值	76
4.5	网格步长控制	78
4.5.1	指数函数	79
4.5.2	双指数函数	79
4.5.3	双曲正切和双曲正弦函数	80
4.6	小结	80
	参考文献	81
第 5 章	复杂外形结构网格生成方法及应用	82
5.1	引言	82
5.2	多块对接和拼接结构网格	82
5.2.1	HyperCube++ 结构	83
5.2.2	HyperCube++ 结构生成	86
5.2.3	HyperCube++ 结构合并	87

5.2.4 多块对接和拼接结构网格应用实例	88
5.3 重叠结构网格	93
5.3.1 子域的划分和网格重叠拓扑结构	93
5.3.2 “洞”边界的生成	95
5.3.3 重叠结构网格应用实例	97
5.4 小结	99
参考文献	100
第 6 章 非结构网格生成方法概述	103
6.1 引言	103
6.2 三种基本的非结构网格生成方法	103
6.2.1 阵面推进法	103
6.2.2 Delaunay 三角化方法	104
6.2.3 基于四叉树/八叉树的网格生成方法	105
6.3 非结构网格技术常用数据结构及搜索算法	106
6.3.1 线性链表	107
6.3.2 二叉树	108
6.3.3 ADT 结构	111
6.3.4 四叉树/八叉树	113
6.4 小结	115
参考文献	115
第 7 章 非结构网格生成之阵面推进法	117
7.1 引言	117
7.2 网格分布控制 —— 背景网格法	117
7.3 阵面推进法	119
7.4 相交性判断	120
7.5 提高网格生成效率和可靠性的方法	122
7.5.1 两个三角形相交预判	122
7.5.2 邻近点和邻近阵元的筛选	122
7.5.3 提高推进效率的其他方法	123
7.5.4 提高阵面推进可靠性的策略	124
7.6 各向异性非结构网格生成	125
7.7 阵面推进法非结构网格生成实例	126
7.8 小结	131
参考文献	132

第 8 章 非结构网格生成之 Delaunay 方法	134
8.1 引言	134
8.2 Voronoi 图和 Delaunay 三角化	134
8.3 Bowyer-Watson 方法	135
8.4 边界完整性保持及边/面交换	139
8.5 约束 Delaunay 方法	141
8.6 自动插入网格节点方法及控制	142
8.7 Delaunay 方法非结构网格生成实例	142
8.8 小结	145
参考文献	145
第 9 章 四叉树/八叉树及 Cartesian 网格生成方法	147
9.1 引言	147
9.2 Cartesian 网格生成方法	148
9.2.1 总体框架	148
9.2.2 模型表面网格数据输入与 ADT 数据结构的建立	150
9.2.3 初始网格的划分和单元连接关系的建立	150
9.2.4 初始网格细分及光滑	150
9.2.5 与模型相交单元和内部单元的判断	152
9.2.6 投影算法及模型特征恢复技术	153
9.3 基于四叉树/八叉树的非结构网格生成方法	156
9.4 黏性流计算网格生成问题	158
9.5 Cartesian 网格生成实例	158
9.6 小结	161
参考文献	161
第 10 章 混合网格生成方法	164
10.1 引言	164
10.2 混合网格生成方法概述	165
10.3 层推进方法	166
10.3.1 几何层推进	166
10.3.2 求解双曲型方程方法	168
10.4 基于各向异性四面体网格聚合的三棱柱网格生成方法	171
10.4.1 聚合四面体单元	172
10.4.2 聚合面	173
10.5 非结构四边形/六面体网格生成方法	174
10.6 混合网格生成实例	175

10.6.1	二维混合网格生成实例	175
10.6.2	三维无黏流计算混合网格生成实例	177
10.6.3	三维简化外形黏性流计算混合网格	181
10.6.4	高升力装置高 Re 数湍流模拟混合网格	182
10.6.5	F6-WB 翼身组合体构型黏性流计算混合网格	182
10.6.6	F6-WBNP 构型混合网格	185
10.6.7	战斗机外形混合网格	187
10.6.8	人体混合网格生成	189
10.7	小结	191
	参考文献	191
第 11 章	网格自适应方法	193
11.1	引言	193
11.2	非结构/混合网格 h-type 自适应方法	194
11.2.1	网格自适应的基本流程	194
11.2.2	自适应判据	195
11.2.3	自适应网格剖分和合并方法	196
11.2.4	自适应网格的优化	200
11.3	网格自适应实例	200
11.3.1	低速圆柱绕流网格自适应	201
11.3.2	NACA0012 翼型高速无黏流动网格自适应	202
11.3.3	三维超声速圆柱绕流网格自适应	203
11.3.4	ONERA-M6 机翼跨声速绕流网格自适应	204
11.3.5	双椭球高超声速绕流网格自适应	206
11.3.6	三角翼大攻角 DES 模拟网格自适应	208
11.4	动态网格自适应	214
11.5	小结	215
	参考文献	215
第 12 章	网格优化技术	219
12.1	引言	219
12.2	网格生成基本规范建议	219
12.3	网格质量判据	221
12.3.1	结构网格质量判据	221
12.3.2	非结构网格质量判据	224
12.4	非结构/混合网格优化技术	225
12.4.1	弹簧松弛法	225

12.4.2	Delaunay 变换技术	226
12.4.3	多方向推进技术	227
12.4.4	局部推进步长光滑	229
12.5	小结	230
	参考文献	230
第 13 章	动态网格技术	233
13.1	引言	233
13.2	动态结构网格生成技术	233
13.2.1	刚性运动网格技术	234
13.2.2	超限插值动网格生成技术	234
13.2.3	重叠结构动网格技术	236
13.2.4	滑移结构动网格技术	236
13.3	动态非结构/混合网格生成方法	237
13.3.1	重叠非结构动网格技术	238
13.3.2	重构非结构动网格技术	239
13.3.3	变形非结构动网格技术	240
13.3.4	变形/重构混合网格生成技术	246
13.4	动态混合网格非定常计算应用实例	253
13.4.1	鱼体巡游数值模拟	254
13.4.2	鸟类扑翼数值模拟	256
13.4.3	机翼/外挂物分离数值模拟	258
13.4.4	复杂多体分离应用	260
13.5	小结	260
	参考文献	261
第 14 章	并行计算网格分区及并行网格生成技术	265
14.1	引言	265
14.2	多块结构网格并行计算	266
14.2.1	子区域间网格关联信息的数据结构	266
14.2.2	负载均衡算法	266
14.2.3	并行通信机制	268
14.3	非结构/混合网格并行生成	272
14.4	非结构/混合网格并行计算	272
14.4.1	几何分区法	272
14.4.2	贪婪算法	273
14.4.3	多级分区算法	274

14.4.4 网格分区实例	275
14.5 小结	277
参考文献	278
第 15 章 多重网格方法	280
15.1 引言	280
15.2 多重网格计算方法简介	282
15.3 多重网格循环方式	284
15.4 数值传递方式	285
15.4.1 限制算子	285
15.4.2 插值算子	286
15.5 多重网格生成方法	286
15.5.1 聚合法基本思想	287
15.5.2 单元性质判断	288
15.5.3 聚合物面网格	288
15.5.4 “阵面推进”聚合黏性层网格	290
15.5.5 聚合无黏区域网格	290
15.6 并行/多重网格耦合方法	292
15.7 多重网格方法的应用实例	292
15.8 小结	300
参考文献	300
第 16 章 外形定义与物面网格生成	302
16.1 引言	302
16.2 物面网格生成基本流程	302
16.3 物面曲面片的定义	303
16.4 曲面片变换	304
16.4.1 平面变换	304
16.4.2 三角形等参抛物面	304
16.4.3 四边形等参 Serendipity 曲面片	305
16.4.4 三角形 Barnhill-Gregory-Nielson 曲面片	306
16.4.5 四边形双线性 Coon's 曲面片	306
16.4.6 单位平面的保形变换	307
16.5 物面非结构网格生成实例	307
16.6 各向异性三角形和三角形/四边形混合物面网格生成	309
16.7 小结	312
参考文献	313