

飞行器动力工程专业系列教材

Computational Fluid Dynamics
Theory and Practice

计算流体力学 基础理论与实践

© 周正贵 王卫星 编著



科学出版社

飞行器动力工程专业系列教材

计算流体力学 基础理论与实践

周正贵 王卫星 编著

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由基础理论和商用软件使用方法两部分组成。第一部分基础理论主要包括以下内容：流场计算基本概念；模型流场及可压缩、不可压缩流场的数值计算方法；流场网格生成方法；流场计算多重网格法加速方法。第二部分商用软件使用方法，是以广泛应用的商用软件 Fluent 为载体，通过多个实例介绍商用软件各模块的使用方法。这部分主要包括以下内容：流场网格生成模块使用方法；流场数值计算设置方法；计算结果后处理方法。

本书可作为高等院校流体力学及相关专业本科高年级学生教材，也可供工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学基础理论与实践/周正贵, 王卫星编著. —北京: 科学出版社, 2017.6

飞行器动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-03-053095-0

I. ①计… II. ①周… ②王… III. ①计算流体力学-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 125420 号

责任编辑: 胡 凯 李涪汁 丁丽丽 / 责任校对: 李 影
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 23 1/2

字数: 550 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《飞行器动力工程专业系列教材》编委会

主 编：宣益民

副主编：宋迎东 张天宏 黄金泉 谭慧俊 崔海涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

王 彬 毛军逵 方 磊 吉洪湖 刘小刚

何小民 宋迎东 张天宏 陈 伟 陈 杰

陈茉莉 范育新 周正贵 胡忠志 姚 华

郭 文 崔海涛 韩启祥 葛 宁 温 泉

臧朝平 谭晓茗



丛书序

作为飞行器的“心脏”，航空发动机是技术高度集成和高附加值的科技产品，集中体现了一个国家的工业技术水平，被誉为现代工业皇冠上的明珠。经过几代航空人艰苦卓越的奋斗，我国航空发动机工业取得了一系列令人瞩目的成就，为我国国防事业发展和国民经济建设做出了重要的贡献。2015年，李克强总理在《政府工作报告》中明确提出了要实施航空发动机和燃气轮机国家重大专项，自主研制和发展高水平的航空发动机已成为国家战略。2016年，国家《第十三个五年规划纲要》中也明确指出：中国计划实施100个重大工程及项目，其中“航空发动机及燃气轮机”位列首位。可以预计，未来相当长的一段时间内，航空发动机技术领域高素质创新人才的培养将是服务国家重大战略需求和国防建设的核心工作之一。

南京航空航天大学是我国航空发动机高层次人才培养和科学研究的重要基地，为国家培养了近万名航空发动机专门人才。在江苏省高校品牌专业一期建设工程的资助下，南京航空航天大学于2016年启动了飞行器动力工程专业系列教材的建设工作，旨在使教材内容能够更好地反映当前科学技术水平和适应现代教育教学理念。教材内容涉及航空发动机的学科基础、部件/系统工作原理与设计、整机工作原理与设计、航空发动机工程研制与测试等方面，汇聚了高等院校和航空发动机厂所的理论基础及研发经验，注重设计方法和体系介绍，突出工程应用及能力培养。

希望本系列教材的出版能够起到服务国家重大需求、服务国防、服务行业的积极作用，为我国航空发动机领域的创新性人才培养和技术进步贡献力量。

南京航空航天大学

2017年5月



前 言

计算流体力学是在流体力学、计算数学、计算机科学与技术的基础上发展而形成的一门新兴学科。运用计算流体力学理论,通过计算机编程,可实现流场计算机模拟(流场数值模拟)。流场计算机模拟耗费小、时间短、省人力,且能对实验难以测量的流动进行模拟。随着计算流体力学理论进展、方法改进和计算机技术迅速发展,计算流体力学已在流体力学相关工业领域中得到越来越广泛的应用,比如航空航天、热能工程、天气预报、海浪和风暴潮预报等。

本书是一本计算流体力学入门教材,由基础理论和商用软件使用方法两部分组成。第一部分基础理论着重阐述计算流体力学的基本概念和基本方法,为商用软件学习提供理论支持,为进一步深造提供基础。这部分主要包括以下内容:①流场计算基本概念;②模型流场及可压缩、不可压缩流场计算方法;③网格生成方法;④多重网格法加速方法。第二部分商用软件使用方法,是以广泛应用的商用软件 Fluent 为载体,通过多个实例介绍商用软件各模块的使用方法。这部分主要包括以下内容:①流场网格生成模块使用方法;②流场数值计算设置方法;③计算结果后处理方法。

本书第 1 章至第 9 章由周正贵编著;第 10 章至第 13 章由王卫星编著。受作者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

本书既可作为高等院校流体力学及相关专业本科高年级学生教材,也可供工程技术人员参考使用。

作 者

2016 年 10 月



目 录

前言	
第 1 章 概述	1
练习题	5
第 2 章 流场数值模拟数学模型及定解条件	6
2.1 可压缩非定常黏性流数学模型	6
2.2 不可压缩非定常黏性流数学模型	8
2.3 无黏流数学模型	9
2.4 常用的模型方程	9
2.5 偏微分方程的数学性质及其与流体运动的关系	10
2.5.1 拟线性偏微分方程组的分类方法	10
2.5.2 偏微分方程组分类的通用方法	13
2.5.3 流体力学控制方程类型分析	14
2.6 流体力学问题的定解条件	18
练习题	20
第 3 章 有限差分近似及其数学性质	21
3.1 差分格式和精度分析	21
3.1.1 一阶偏导数差分格式	22
3.1.2 二阶偏导数差分格式	24
3.1.3 差分方程	25
3.2 差分方程的数学性质	27
练习题	36
第 4 章 模型方程的常用差分格式	37
4.1 对流方程差分格式	37
4.2 扩散方程差分格式	39
4.3 对流-扩散方程差分格式	40

4.4	计算实例——两平行平板间非定常流	41
4.5	多维问题的几种常用差分格式	44
	练习题	49
第 5 章	不可压缩流场的数值计算	50
5.1	不可压缩流场计算的流函数涡量法	50
5.1.1	不可压缩无黏流场计算的流函数涡量法	50
5.1.2	计算实例——内置方形体的突然扩张通道流	57
5.1.3	不可压缩黏性流场计算的流函数涡量法	59
5.1.4	计算实例——平板驱动方腔内流场计算	62
5.2	不可压缩黏性流求解的原始变量法	64
5.2.1	不可压缩流基本方程分析	64
5.2.2	人工压缩性方法	65
5.2.3	压力修正方法	67
5.2.4	边界条件	70
	练习题	71
第 6 章	可压缩流场的数值计算	72
6.1	MacCormack 格式	72
6.1.1	对流模型方程的 MacCormack 格式	72
6.1.2	一维欧拉方程的 MacCormack 格式	74
6.1.3	多维欧拉方程的 MacCormack 格式	75
6.2	多步龙格-库塔格式	76
6.2.1	一维欧拉方程的四步龙格-库塔格式	76
6.2.2	二维欧拉方程的四步龙格-库塔格式	78
6.3	矢量通量分裂差分格式	78
6.3.1	一维欧拉方程逆风差分	78
6.3.2	二维欧拉方程逆风差分	81
6.4	TVD 格式和总变差	82
6.4.1	总变差及其衰减	83
6.4.2	TVD 格式	84
6.5	隐式时间离散	86
6.6	可压缩黏性流的差分计算	88
6.7	计算举例——超音速平板流的数值计算	89
	练习题	92
第 7 章	流场网格生成	93
7.1	贴体坐标	93
7.2	坐标转换关系	95
7.2.1	一维坐标转换	96
7.2.2	二维和三维坐标转换	96

7.2.3	任意曲线坐标系下的基本方程	97
7.3	网格生成	98
7.3.1	代数生成方法	99
7.3.2	微分方程生成方法	101
7.3.3	壁面处网格正交性分析	105
7.3.4	自适应网格简介	106
7.3.5	计算网格生成实例——卡门翼型绕流计算网格	109
	练习题	111
第 8 章	三维紊流平均流的有限差分计算	112
8.1	紊流流动计算方法分类	112
8.2	三维紊流平均流 N-S 方程	113
8.3	紊流模型方程	114
8.3.1	Baldwin-Lomax 模型的双层代数紊流模型	115
8.3.2	$k-\varepsilon$ 方程紊流模型	115
8.4	控制方程的空间离散	116
8.5	人工黏性	117
8.6	控制方程的时间离散	119
8.7	加速技术	119
8.7.1	局部时间步长	119
8.7.2	隐式残值光顺	120
	练习题	121
第 9 章	流场计算多重网格加速方法	122
9.1	迭代法的误差衰减	122
9.2	多重网格法的计算过程	124
9.3	非定常 N-S 方程多重网格法计算过程	129
	练习题	130
第 10 章	Fluent 软件基础知识与基本操作	131
10.1	软件概述	131
10.1.1	软件构成	131
10.1.2	适用范围	131
10.2	启动方法	132
10.3	用户界面	136
10.3.1	图形用户界面	136
10.3.2	文字用户界面	139
10.4	文件读入与输出	141
10.4.1	读入网格文件	141
10.4.2	读写算例和数据文件	143
10.4.3	创建与读取日志文件	144

10.4.4	读写边界函数分布文件	146
10.4.5	读写边界条件	148
10.4.6	保存图像文件	148
10.4.7	导出数据	149
10.5	单位设置	150
10.5.1	单位限制	150
10.5.2	网格数据单位	151
10.5.3	Fluent 内部单位制	151
10.5.4	调整数据单位	151
10.6	计算策略	152
10.6.1	制订计划	152
10.6.2	计算步骤	153
10.7	计算方法	154
10.8	物性参数	156
10.8.1	物性参数设定界面	156
10.8.2	密度设置	159
10.8.3	黏性	162
10.8.4	热传导系数	165
10.8.5	热容	167
10.8.6	操作压强	168
10.9	边界条件	169
10.9.1	边界条件概述	170
10.9.2	进口边界	173
10.9.3	出口边界	181
10.9.4	其他常用边界	185
10.9.5	体积区域条件	195
10.10	湍流模型	197
10.10.1	湍流模型简介	197
10.10.2	Spalart-Allmaras 模型	198
10.10.3	κ - ϵ 湍流模型	199
10.10.4	κ - ω 湍流模型	200
10.10.5	雷诺应力模型 (RSM)	201
10.10.6	近壁面流动处理	201
10.10.7	湍流模拟近壁处网格划分规则	205
10.11	小结	206
第 11 章	网格生成软件介绍与基本操作	207
11.1	网格基本知识	207
11.1.1	网格划分的几何要素	207

11.1.2	网格形状与拓扑结构	208
11.2	Gambit 软件	210
11.2.1	软件介绍与功能	210
11.2.2	用户界面	211
11.2.3	基本操作	212
11.2.4	命令功能介绍	212
11.2.5	二维轴对称喷嘴自由射流计算网格	213
11.2.6	二维平面叶栅计算网格生成	224
11.2.7	三维叶片计算网格生成	235
11.3	Icem 软件	240
11.3.1	软件介绍与功能	240
11.3.2	软件操作界面	241
11.3.3	基本操作	245
11.3.4	网格生成流程	246
11.3.5	非结构网格生成方法	246
11.3.6	二维结构网格生成方法	256
11.3.7	三维结构网格生成方法	267
11.4	小结	270
第 12 章	流场计算实例	271
12.1	拉瓦尔喷管流场	271
12.1.1	问题描述	271
12.1.2	计算设置	272
12.1.3	计算结果输出与显示	281
12.2	进气道流场	284
12.2.1	问题描述	284
12.2.2	计算设置	284
12.2.3	计算结果输出与显示	290
12.3	二维平面叶栅流场计算	293
12.3.1	问题描述	293
12.3.2	计算设置	293
12.3.3	计算结果输出与显示	300
12.4	三维叶栅流场计算	303
12.4.1	问题描述	303
12.4.2	计算设置	304
12.4.3	计算结果输出与显示	311
12.5	燃烧及化学反应计算	314
12.5.1	问题描述	314
12.5.2	计算设置	315

12.5.3	计算结果输出与显示	327
12.6	小结	330
第 13 章	计算结果后处理方法	331
13.1	Tecplot 软件	331
13.1.1	软件介绍与功能	331
13.1.2	用户界面	331
13.1.3	基本操作	331
13.2	二维流场处理	338
13.3	三维流场处理	348
13.4	小结	361
参考文献		362



第1章 概述

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 又称流场数值模拟, 是研究流体力学的一种方法。研究流体力学主要有三种方法, 即实验研究、基础理论研究和流场数值模拟。实验研究结果真实可靠, 是发现流动规律、检验理论和为流体机械设计提供数据的基本手段, 但实验也有其局限性, 对于大尺寸的研究对象 (比如飞机), 必须制作缩尺模型, 严格来说模型流场所有无量纲参数应与真实流动相同, 但实际上很难办到, 通常只能满足主要而忽略次要。实验还要受测量技术的制约, 比如: 航空发动机压气机、燃烧室、涡轮内部流动涉及高温、复杂几何造型、转静子相互影响, 很难进行流场细节测量。此外, 实验还需要进行模型加工、测量仪器设备准备等, 因而周期长、费用高。基础理论研究建立了各种类型流动控制方程, 奠定了计算流体力学基础; 并借助实验和流场数值计算结果, 进一步探索流体运动规律。

自 1946 年第一台电子计算机问世以来, 计算机技术迅速发展。计算流体力学作为流体力学研究的另一分支应运而生, 并借助于计算机技术而快速发展。20 世纪 70 年代至 80 年代, 由于受计算机内存和速度的限制, 计算流体力学仅能对无黏流场和一些简单的二维黏性流场进行数值计算。80 年代后, 随着数值模拟实用价值在工程实际中的展示以及计算机技术的进一步发展, 吸引了大批研究人员投身于计算流体力学中, 构造出很多适合于各种流动情况的数值计算方法。现在工程中的大部分流动问题都可以用计算机进行数值模拟。在航空上比较复杂的流动, 比如飞机全机身绕流 (外流问题)、航空发动机各零部件的三维黏性流场 (内流问题) 等都可以采用数值计算比较准确地模拟。对于那些复杂而实验测量较困难的流动问题 (比如航空发动机各部件内部复杂流动), 数值模拟还可用来部分代替实验探索流动规律。

以下给出几个 CFD 方法在航空航天及民用领域的应用实例, 有助于大家加深对其感性认识。图 1.1 为采用 CFD 方法模拟的航天飞机表面温度分布; 图 1.2 为涡轮叶片通道三维流场计算结果, 由图 1.2(b) 可以看出, 计算得到的叶片表面等熵马赫数与实验值吻合很好; 图 1.3 为美国 NASA 公司设计的用于涡轮风扇发动机的风扇转子实物以及计算性能特性与实测值的比较, 两种结果的一致性也很好; 图 1.4 为汽车在行驶中空气绕流流线; 图 1.5 为翼型绕流流线。

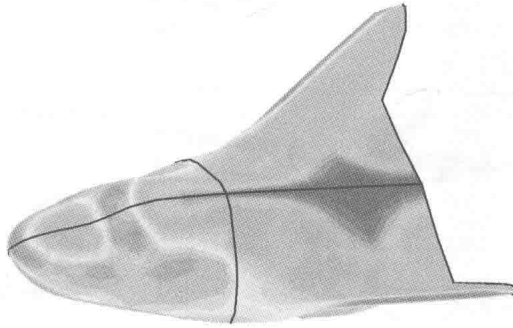
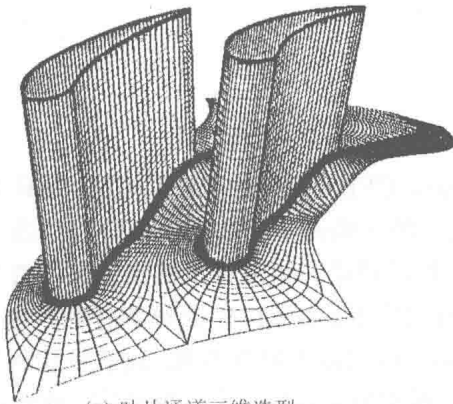
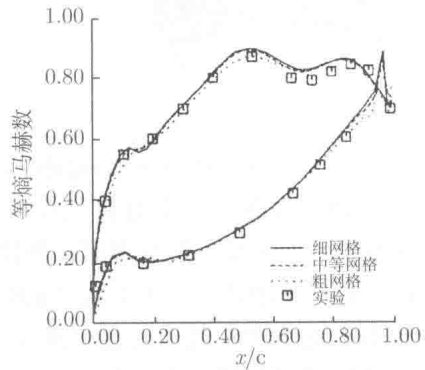


图 1.1 航天飞机表面温度分布

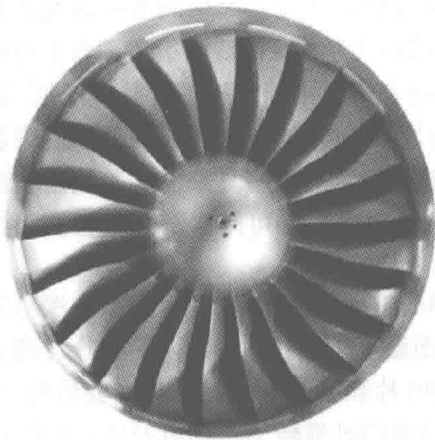


(a) 叶片通道三维造型

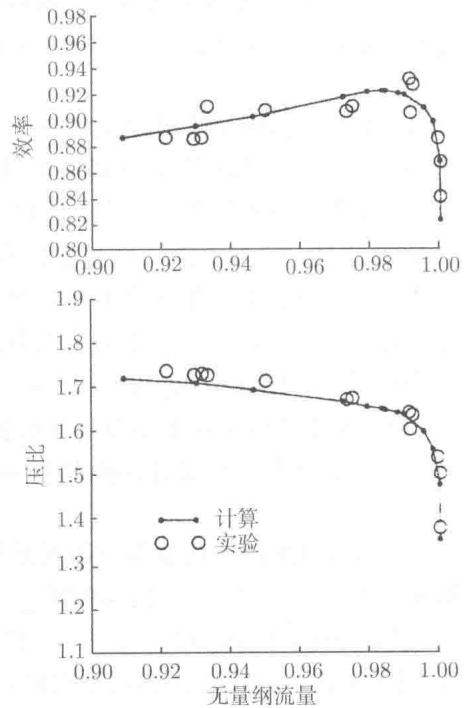


(b) 叶片表面等熵马赫数分布

图 1.2 涡轮叶片通道三维流场计算



(a) 风扇转子实物照片



(b) 计算性能特性与实测值

图 1.3 NASA Rotor67 型风扇转子相关参数

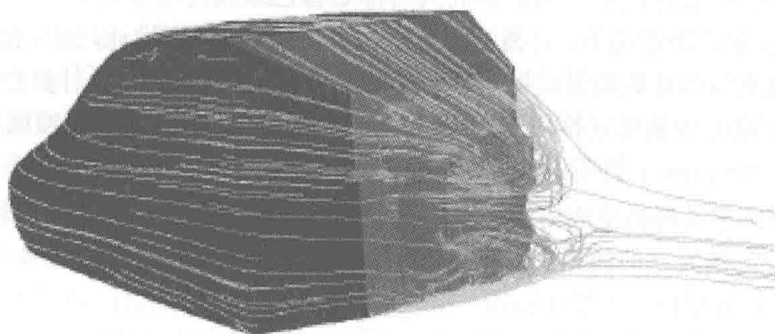
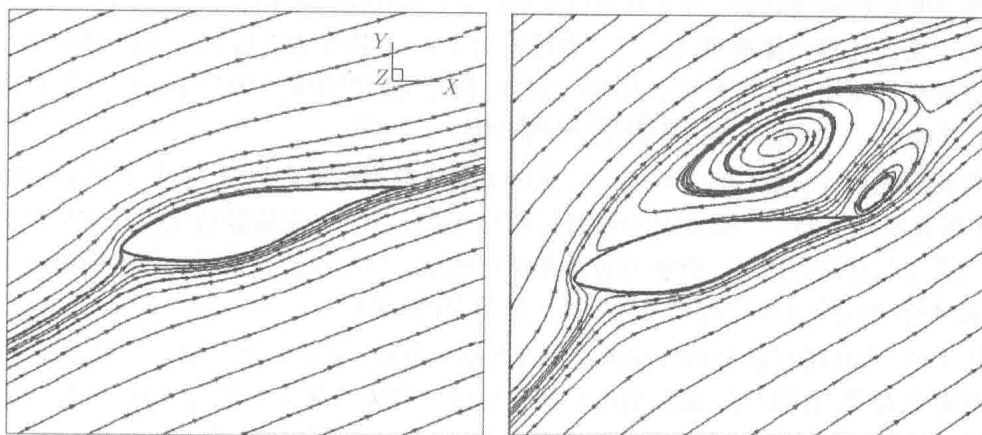


图 1.4 汽车在行驶中空气绕流流线



(a) 近设计攻角

(b) 大攻角

图 1.5 翼型绕流流线

计算流体力学具有耗费小、时间短、省人力等优点, 以及还能对实验难以测量的流动进行模拟; 并且对于多数工程实际中的流动问题, 流场数值计算具有较高精度。因而, 计算流体力学已在工业领域中得到越来越广泛的应用, 比如航空航天、核工业、热能工程、天气预报、海浪和风暴潮预报等。

工程实际中的流动大多数为较高雷诺数流动问题, 附面层层流和紊流区域共存, 并且以紊流区域为主。紊流流场计算大都采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程方法, 即 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 方程方法。采用 RANS 方程方法计算引入的紊流模型属经验或半经验关系式, 因此会影响计算精度, 特别是大分离流动的计算精度。为此近几年发展出大涡模拟 (large-eddy simulation, LES) 和分离涡模拟 (detached-eddy simulation, DES) 方法。这两种方法可有效提高分离流计算精度, 但与 RANS 方法比较, 计算时间大幅度增加。对于紊流运动, 描述其运动的控制方程为经典的 Navier-Stokes 方程, 也可直接进行离散求解, 即 DNS(direct Navier-Stokes) 方法。但由于紊流流动是三维非定常流, 且各种涡的尺度变化较大, 要数值模拟这种流动, 需要有足够密的网格节点分布。限于计算机速度, 目前这种方法在工程实际中还未能得到应用, 但已有相关研究人员采用这种方法对一些简单流动的数值计算, 研究该方法对大分离预测精度、紊流附面层流动机理、附面层转捩以及对紊流模型的应用价值。

在商用流场计算软件出现以前, 研究人员都是自己编程对所研究的流场进行数值模拟。由于 Fortran 语言语法简单, 且易于实现结构化、模块化程序设计, 因此被广泛采用。但研究人员自己独立编程既低效又难以实现程序的高性能 (适用范围广、计算精度高、使用便捷)。十来年前, 欧美国家陆续推出了商用流场计算软件, 而在航空航天领域应用较广泛的有 Fluent 软件、Numeca 软件等。

Fluent 软件由于其网格生成模块灵活性强、包含的功能模块多, 因此具有较好的通用性, 广泛适用于各种流体流动的模拟。Numeca 软件是在国际著名叶轮机械气体动力学及 CFD 专家、比利时布鲁塞尔自由大学 Charles Hirsch 教授的倡导下研制的。该软件进入市场之初主要用于叶轮机械流场计算, 近年来不断改进扩充, 也可用于非叶轮机械流场计算, 但其主要特色仍然是叶轮机械流场计算。对于叶轮机械流场计算, Numeca 软件可方便地生成高质量网格, 并且具有丰富的计算结果处理选择性。通过使用 Fluent 软件和 Numeca 软件对多个叶轮机械流动问题进行计算比较, 结果差别很小。当然这也是可以理解的, 因为不管何种商用流场计算软件, 其内核——流动控制方程是完全相同的。

随着商用流场计算软件的推广应用, 流体力学研究得到很大促进, 高校和研究所更多采用 CFD 仿真取代实验, 大幅度缩短研究周期与成本。当然, 流场数值模拟和实验研究、理论研究三者互相促进, 任何一种研究方法都不可偏废。但可以肯定的是, 数值模拟较实验研究和理论分析所占的分量将越来越大, 这一趋势是确定的。

采用 CFD 方法进行流场数值模拟是以计算机为基础, 通过数值计算以数据和图像显示, 再现研究对象及其内在规律。流场数值模拟也可以理解为用计算机来做实验。比如一个机翼绕流, 通过计算可得到其升力、阻力数值, 由图形显示可看到流场的各种细节: 绕流流线, 激波的位置、强度, 流动分离, 涡的生成与传播等。

实际上作为连续介质的流体运动是一个无限的信息系统, 而计算机的内存以及对数值所能表示的数位都是有限的。流场数值模拟需要在流场中按一定规律排列有限个点 (这些点叫网格节点), 用这些离散点上的信息近似表示整个连续流场, 在流场中分布点即为网格生成; 然后将流动控制方程 (如 N-S 方程) 运用于这些由网格线划分成的微小单元体 (二维流动对应的单元体为面), 求出其流动参数, 此过程称为流场控制方程求解; 最后根据这些网格节点上的流动参数值处理出各种所需的信息, 比如: 上所述的机翼绕流的升力、阻力、流线等。此过程称为计算结果后处理。由此可知, 流场数值模拟由网格生成、流场计算、计算结果后处理 3 个步骤组成。

计算流体力学涉及流体力学、计算数学、计算机语言、计算机图形学以及计算机技术, 是多学科综合形成的新兴学科, 由此体现出这门学科的复杂性与难度。其复杂性和难度还体现在以下几个方面。

计算流体力学求解流体力学控制方程通常为多个非线性方程组成的方程组, 比如三维 N-S 方程是由连续方程、3 个动量方程、能量方程等 5 个基本方程构成的方程组, 方程包含的项数很多, 此外还涉及补充方程, 比如气体状态方程、紊流模型方程等。这些方程的推导、离散、求解难度很大, 主要涉及流体力学和计算数学等。

工程实际中流场边界通常不规则而且复杂, 比如: 飞机绕流流场计算中飞机外形、航空发动机压气机转静子多排叶片、燃烧室和带冷却气孔涡轮叶片等。在流场中合理分布网格以

及计算结果后的处理涉及较复杂的计算机图形学。因此, 具有较好的工程实用价值、通用性和良好用户界面的流场计算软件编写和调试是非常耗费人力的。

随着商用流场计算软件功能不断拓展, 性能不断提高, 极大地促进了商用软件在流体力学相关研究中的应用。本教材力图采用浅显易懂的方式阐述计算流体力学基础理论和实际应用, 以帮助读者获得商用流场计算软件应用的基本知识和基本技能。

练 习 题



1. 什么是计算流体力学?
2. 计算流体力学主要有哪些重要特点?
3. 流场数值计算由哪几个步骤组成? 并说明每一步功能。