



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

# 计算流体力学教程

■ 张德良 编著

**A Course in Computational  
Fluid Dynamics**



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



中国科学技术大学研究生教材系列

# 计算流体力学教程

田 文 著

A Course in Computational  
Fluid Dynamics

清华大学出版社



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

# 计算流体力学教程

Jisuan Liuti Lixue Jiaocheng

■ 张德良 编著

## A course in Computational Fluid Dynamics



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING

## 内容简介

本书属于“中国科学院研究生院教材”系列。本书主要介绍计算流体力学中的有限差分算法和有限体积算法及它们的应用。全书共分上、下两篇:上篇共有8章,主要介绍差分算法理论基础;下篇共有6章,主要介绍差分算法应用研究和网格生成技术。为便于读者学习和应用,配书光盘包含若干算法的算例和用C语言和FORTRAN77语言编写的计算程序。

本书强调基础、突出应用、关注最新进展。通过学习本书,读者能对计算流体力学有一个系统和深入的理解,并掌握扎实的理论基础和具备较强的解决实际问题的能力。

本书可作为力学、机械、航空航天、热能等专业及相关专业的研究生教学用书,以及高年级的本科生学习计算流体力学的教材,也可作为从事数值模拟的科研人员和工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学教程/张德良编著. —北京:高等教育出版社,2010.10

ISBN 978-7-04-029741-6

I. ①计… II. ①张… III. ①计算流体力学-研究生-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第140809号

策划编辑 水 渊      责任编辑 赵向东      封面设计 张 志  
版式设计 马敬茹      责任校对 金 辉      责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司  
印 刷 北京明月印务有限责任公司

开 本 787×1092 1/16  
印 张 31.75  
字 数 660 000

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010年11月第1版  
印 次 2010年11月第1次印刷  
定 价 60.00元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29741-00

## 中国科学院研究生院教材编审委员会

---

主任:白春礼

顾问:余翔林

副主任:马石庄(常务) 刘志鹏 韩兴国 苏刚

委员(按姓氏笔画排列):

石耀霖	李家春	李伯聪	李佩	刘嘉麒	张文芝
张增顺	吴向	汪尔康	汪寿阳	杨乐	徐至展
阎保平	黄荣辉	黄钧	彭家贵	裴钢	谭铁牛

# 总 序

---

在中国科学院研究生院和高等教育出版社的共同努力下,凝聚着中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血和汗水的中国科学院研究生院教材面世了。这套教材的出版,将对丰富我院研究生教育资源、提高研究生教育质量、培养更多高素质的科技人才起到积极的推动作用。

作为科技国家队,中国科学院肩负着面向国家战略需求,面向世界科学前沿,为国家作出基础性、战略性和前瞻性的重大科技创新贡献和培养高级科技人才的使命。中国科学院研究生教育是我国高等教育的重要组成部分,在新的历史时期,中国科学院研究生教育不仅要为我院知识创新工程提供人力资源保障,还担负着落实科教兴国战略和人才强国战略,为创新型国家建设培养一大批高素质人才的重要使命。

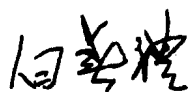
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源,中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式,在突出科学教育和创新能力培养的同时,重视全面素质教育,倡导文理交融、理工结合,培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

研究生教材建设是研究生教育中重要的基础性工作。由一批活跃在科学前沿,同时又具有丰富教学经验的科学家编写的中国科学院研究生院教材,适合在校研究生学习使用,也可作为高校教师和专业研究人员的参考书。这套研究生教材内容力求科学性、系统性、基础性和前沿性的统一,使学习者不仅能获得比较系统的科学基础知识,也能体会蕴于其中的科学精神、科学思想、科学方法,为进入科学研究的学术殿堂奠定良好的基础;优秀教材不但是体现教学内容和教学方法的知识载体、开展教学的基本条件和手段,也是深化教学改革、提高教育质量、促进科学教育与人文教育结合的重要保证。

“十年树木,百年树人”。我相信,经过若干年的努力,中国科学院研究生院一定

能建设起多学科、多类型、多品种、多层次配套的研究生教材体系,为我国研究生教育百花园增添一枝新的奇葩,为我国高级科技人才的培养作出新的贡献。

中国科学院常务副院长  
中国科学院研究生院院长  
中国科学院院士



二〇〇六年二月二十八日

# 序 言

---

近 50 年来,计算流体力学(简称 CFD)的建立和快速发展给流体力学学科及其交叉研究领域带来了新的研究手段,即数值模拟。该手段与原有的研究手段(实验观测和理论分析)相结合,有力地推动着流体力学及其交叉学科向纵深发展。在信息科学和技术飞速发展的大背景下,CFD 越来越显示出其重要作用,不仅成为力学研究的重要手段,而且已深入到相关工程技术领域,形成供工程设计用的包含 CFD 的数值计算软件,并由此构成虚拟仿真技术。

CFD 本身就是流体力学与计算数学、计算机科学的交叉分支学科,有着自己的理论和方法。因此,在与 CFD 相关的学科和工程技术领域就读的研究生中,普及 CFD 的理论、方法和实践应用,深入且熟练地掌握其知识和技能,十分必要。

中国科学院研究生院是为中国科学院各研究所培养研究生,特别是为他们开设基础性课程的教育基地,多科性、综合性、教学与科研结合是中国科学院研究生院的办学特色。我们很早就开设了计算流体力学课程,选课的学生来自力学、工程热物理、地球科学、化工和其他相关学科,他们从事的研究工作涉及航空航天、能源、大气、海洋、环境、交通等工程科学领域,选课的人数逐年增加,已达到百人以上的规模。

从 1991 年起,我们聘请了中国科学院力学研究所的张德良教授来研究生院讲授这门课程。近 20 年来,他本着“注重概念,强调基础;学以致用,突出应用;启发教育,学研结合”的教学理念,不断改进授课的内容和形式。例如,他在期末采用了独特的考试方式,给学生布置各不相同的计算作业,要求独立完成编程、计算、验证、分析和讨论的全过程,最后进行口试,以培养学生应用 CFD 独立解决实际问题的能力。在不断积累教学经验的基础上,他编写和印发了这门课程的讲义。多年来的实践证明,这门课的教学特色明显,深受学生欢迎,多次被评为中国科学院研究生院优秀课程,并在 2008 年获得我院集中教学突出贡献奖。

现在,张德良教授编著的《计算流体力学教程》即将由高等教育出版社出版,



多年的辛勤耕耘, 终结硕果。我谨向作者表示祝贺, 并相信, 这本书会受到读者的欢迎。

童秉纲

2009年12月于北京

# 前 言

---

在欢庆国庆 60 周年之际,《计算流体力学教程》一书终于完稿,即将出版,我内心感到无比欣慰。这是我近 20 年的长期教学实践的结晶,也是对国庆 60 周年表达的点滴心意。

1991 年,我接受中国科学院研究生院物理部的聘请,讲授计算流体力学课程。根据研究生院课程设置的要求,在长期的教学实践中,我对这门课程的讲授内容和形式,以及考试方式进行了不断摸索和改进,深感需要有一本内容系统完整,理论紧密联系应用,读后既能掌握基本概念和基础理论,又会编制和调试程序,也能应用于工程实践的教科书。《计算流体力学教程》就是根据这一思路写成的,希望本书能成为读者学习计算流体力学的入门书,也能成为他们在计算流体力学领域中进一步发展和开拓的专业教科书。本书的主要特色如下:

(1) **注重概念,强调基础。**本书包括上、下两篇。上篇为差分算法理论基础,下篇为差分算法应用研究。无论理论基础部分,还是算法应用研究部分,都涉及较多流体力学知识和数学理论。但本书不是偏重于高深的理论推导,而是注重于物理概念、核心思想和应用思路的讲述,特别是重视基本概念和基础理论的讲解和应用。希望本书能为读者打下良好的理论基础,也为他们今后的发展奠定基础。

(2) **学以致用,突出应用。**本书注重理论联系实际,强调学以致用。本书在讲授理论和算法时,都配有算例,帮助读者对讲解的理论和算法深入理解,掌握它们的要点和核心。书后附有光盘,其中包括若干可压缩无黏流动和不可压缩黏性流动的实际应用算例和采用 C 语言和 FORTRAN77 语言编制的程序,供读者学习参考,有助于他们学习编制计算程序,以培养读者的动手能力和独立解决问题的能力。

(3) **启发教育,学研兼顾。**中国科学院研究生院的学生都来自中国科学院的各个研究所、各个不同的学科领域,为此作者在讲授本书时,注意采用启发式教育,并把课程内容与各研究所的研究工作和学生的研究论文结合起来。所以本书适应性较强,适合于比较广泛的专业读者的学习。

本书出版前经历了近 20 年的教学实践的检验,也在各种不同的学术活动和培训学习中试讲过,从学生的反映来看,教学效果是好的,基本上达到了作者的设想。本书适合于流体力学、气体动力学、工程热物理、地球流体力学、环境流体力学以及与流体力学相关的航空航天领域和其他工程科学的硕士生、博士生和工程技术人员,还可以供对计算机数值实验和数值仿真感兴趣的读者阅读和学习之用。

在作者授课和写作本书过程中,曾得到各方面的学者同仁的支持和帮助。在这里,作者特别要感谢中国科学院研究生院的童秉纲院士,他在教学过程中给予我特别的支持和帮助;也要感谢中国科学院力学研究所的傅德薰研究员和马延文研究员,无论在学术上还是教学上都给了我很多悉心指教和真诚的帮助;作者还要感谢马晖扬教授对本书的认真校对和为本书出版提出的宝贵意见。作者也对多年来各任助教和听课的各届学生对本课程的支持和帮助表示感谢,在完成本书的过程中也包含了他们的努力。此外,中国科学院研究生院领导和高等教育出版社对本书的出版给予了支持,作者在此表示衷心感谢!

作者希望本书的出版能有助于促进我国计算流体力学的理论研究、流动数值仿真和工程应用的深入发展。但由于作者才疏学浅,难免存在不当之处,希望使用本书的广大读者给予批评和指正。

张德良

2009 年 10 月于北京

# 目 录

---

第一章 绪 论	1
第 1 节 引言	1
第 2 节 什么是计算流体力学	3
第 3 节 计算流体力学发展概况	7
第 4 节 计算流体力学、理论流体力学及实验流体力学的关系	8
第 5 节 验证与确认	10
参考文献	13

## —— 上篇 差分算法理论基础 ——

第二章 流体力学基本方程组	17
第 1 节 描述流体运动的方法	17
第 2 节 推导流体力学基本方程组的基本思路	18
第 3 节 流体力学基本方程组	19
第 4 节 流体力学基本方程组分析和应用	26
第 5 节 湍流基本方程组简介	29
第 6 节 连续介质力学基本方程组简介	34
第 7 节 流体力学基本方程组数学性质及其类型	37
第 8 节 流体流动定解条件的提法	54
参考文献	60
第三章 模型方程及其数学物理性质	62
第 1 节 模型方程类型	62
第 2 节 对流方程及其数学物理性质	63
第 3 节 扩散方程及其数学物理性质	66
第 4 节 对流-扩散方程及其数学物理性质	67

第 5 节	浅水波方程及其数学物理性质 .....	70
第 6 节	Riemann 问题间断解 .....	74
	参考文献 .....	82
<b>第四章</b>	<b>有限差分算法理论基础 .....</b>	<b>83</b>
第 1 节	有限差分方程离散化 .....	84
第 2 节	差分方程构造方法 .....	86
第 3 节	差分方程有效性分析 .....	89
第 4 节	差分方程稳定性分析——Fourier 分析法 .....	98
第 5 节	Fourier 法分析差分方程稳定性算例 .....	101
第 6 节	差分方程耗散性和色散性的 Fourier 分析法 .....	112
第 7 节	差分方程耗散性和色散性的 Taylor 分析法 .....	119
	参考文献 .....	122
<b>第五章</b>	<b>非线性演化方程数值分析 .....</b>	<b>124</b>
第 1 节	非线性演化方程及其特性 .....	124
第 2 节	非线性演化方程广义解——弱解 .....	128
第 3 节	弱解的唯一性条件——熵条件 .....	129
第 4 节	非线性差分方程稳定性讨论 .....	133
第 5 节	非线性差分方程局部线性化稳定性分析 .....	136
	参考文献 .....	137
<b>第六章</b>	<b>方程(组)的典型差分格式 .....</b>	<b>139</b>
第 1 节	引言 .....	139
第 2 节	模型方程的典型差分格式 .....	141
第 3 节	守恒型方程(组)与守恒型差分格式 .....	147
第 4 节	特征型方程(组)与特征型差分格式 .....	154
第 5 节	Jacobian 系数矩阵分裂和流通量矢量分裂 .....	161
第 6 节	流体力学多维问题的差分格式和算法 .....	168
第 7 节	黏性流动 N-S 方程组的差分格式和数值解法 .....	174
第 8 节	差分格式的时间微商离散问题 .....	176
	参考文献 .....	178
<b>第七章</b>	<b>差分方程(组)数值解法 .....</b>	<b>180</b>
第 1 节	Gauss 消去法 .....	180
第 2 节	追赶法 .....	181
第 3 节	迭代法 .....	184
第 4 节	交替方向隐式差分法(ADI 法) .....	185
第 5 节	隐式近似因式分解法(AF 法) .....	189
第 6 节	多重网格法 .....	192

第 7 节 预处理法 .....	194
参考文献 .....	199
<b>第八章 有限体积算法基础 .....</b>	<b>201</b>
第 1 节 有限体积算法基本思路和做法 .....	201
第 2 节 有限体积算法离散化 .....	205
第 3 节 对流方程有限体积算法 .....	210
第 4 节 对流-扩散方程有限体积算法 .....	215
第 5 节 有限体积算法和有限差分算法之间的关系 .....	228
第 6 节 有限体积算法的精度和守恒性分析 .....	229
第 7 节 有限体积算法在二维不可压缩黏性流动问题中的应用 .....	230
参考文献 .....	238
<b>—— 下篇 差分算法应用研究 ——</b>	
<b>第九章 差分算法应用研究综述 .....</b>	<b>243</b>
第 1 节 可压缩无黏流动数值解法发展概况 .....	244
第 2 节 不可压缩黏性流动数值解法发展概况 .....	244
第 3 节 网格生成技术发展概况 .....	246
参考文献 .....	247
<b>第十章 激波间断数值处理 .....</b>	<b>248</b>
第 1 节 引言 .....	248
第 2 节 人工黏性效应及其应用 .....	250
第 3 节 提高激波捕捉质量的算法 .....	255
第 4 节 近代高分辨率激波捕捉技术 .....	258
参考文献 .....	260
<b>第十一章 高分辨率捕捉激波算法 .....</b>	<b>262</b>
第 1 节 间断分解算法——Godunov 差分格式 .....	262
第 2 节 迎风型 Roe 算法——Roe 差分格式 .....	266
第 3 节 高阶精度间断分解算法——MUSCL 差分格式 .....	279
第 4 节 间断分解算法在二维无黏流动中的应用 .....	288
第 5 节 总变差不增算法——TVD 差分格式 .....	300
第 6 节 TVD 差分算法在二维可压缩无黏流动中的应用 .....	315
第 7 节 无振荡无自由参数耗散算法——NND 差分格式 .....	324
第 8 节 NND 差分格式在二维可压缩无黏流动中的应用 .....	338
参考文献 .....	344
<b>第十二章 不可压缩黏性流动数值算法 .....</b>	<b>346</b>
第 1 节 涡量-流函数算法 .....	346

第 2 节	涡量-流函数算法在二维不可压缩黏性流动中的应用 .....	350
第 3 节	求解原始变量 N-S 方程组算法 .....	355
第 4 节	求解压力 Poisson 方程算法 .....	358
第 5 节	求解压力 Poisson 方程算法在二维不可压缩黏性流动中的应用 .....	375
第 6 节	求解定常原始变量 N-S 方程组的人工压缩算法 .....	380
第 7 节	人工压缩算法在二维不可压缩黏性流动中的应用 .....	384
第 8 节	压力校正算法(SIMPLE 算法) .....	388
第 9 节	SIMPLE 算法在二维不可压缩黏性流动中的应用 .....	394
	参考文献 .....	406
<b>第十三章</b>	<b>高阶精度数值算法新进展 .....</b>	<b>409</b>
第 1 节	基本无振荡差分算法(ENO 算法) .....	409
第 2 节	加权基本无振荡差分算法(WENO 算法) .....	424
第 3 节	显式迎风型三阶 ENO 和五阶 WENO 算法 在二维可压缩无黏流动中的应用 .....	431
第 4 节	紧致算法——COMPACT 差分格式 .....	441
第 5 节	迎风型紧致算法中激波间断捕捉技术 .....	449
第 6 节	迎风型紧致算法在不可压缩黏性流动 和可压缩无黏流动中的应用 .....	454
	参考文献 .....	466
<b>第十四章</b>	<b>网格生成技术概述 .....</b>	<b>469</b>
第 1 节	网格生成技术简介 .....	469
第 2 节	网格生成基本做法和类型 .....	471
第 3 节	网格生成技术基本方法 .....	474
第 4 节	分区网格生成法简介 .....	480
第 5 节	Cartesian 结构网格与自适应技术简介 .....	480
第 6 节	运动网格技术——浸入边界法 .....	483
第 7 节	非结构网格技术 .....	485
第 8 节	结构网格和非结构网格相结合的混合网格技术 .....	489
	参考文献 .....	489

# 第一章 绪 论

## 第 1 节 引 言

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)是 20 世纪 60 年代伴随着计算机科学迅速崛起而形成的,它是通过计算机数值模拟(或数值仿真)和可视化处理,对流体流动和热传导等相关物理现象进行计算机数值分析和研究的一门力学分支学科<sup>[1,2]</sup>。

计算流体力学是一门新兴学科。1965 年美国学者 Harlow 和 Fromm 在美国的《Scientific American Article》杂志上发表了“流体力学中的计算机实验”论文<sup>[3]</sup>,受到各国学者的普遍关注。人们对计算机数值模拟所具有的强大发展潜力产生了浓厚兴趣。几乎同时,法国学者 Macagno 在法国的《Le Houille Blanche》杂志上发表了另一篇类似的论文“流体力学模拟的某些新概念”。这两篇论文明确和清晰地提出了关于计算机数值模拟和计算机实验的某些基本概念,成为计算流体力学兴起的重要标志。在这两篇论文发表之后,“计算流体力学”一词被正式提出来,计算流体力学也作为一门独立学科正式被确立。

随后,1966 年出版了一本专门研究流体力学和相关物理学数值模拟的计算物理杂志《Journal of Computational Physics》;1969 年又出版了两本专门研究数值算法的杂志:《International Journal for Numerical Method in Fluids》和《International Journal for Numerical Method in Engineering》;接着,1973 年和 1975 年又出版了两本数值计算方面的杂志:《Computer Progress in Science and Engineering》和《Computer and Fluids》;1976 年出版了由 Roache 编著的第一本计算流体力学专著《Computational Fluid Dynamics》<sup>[4]</sup>。从此正式确立了计算流体力学在流体力学中的地位,并使它进入了发展和繁荣时期。

在过去的半个世纪里计算流体力学得到了飞速发展,已经深入到流体力学各个



领域。它的研究方法——计算机数值模拟已成为研究流体力学的三大方法(分析、实验和数值模拟)之一。它作为流体力学一个重要分支,独立存在于力学领域之中。目前,它仍然以旺盛的生命力不断地向前发展和开拓,并对力学的发展产生重要的影响。

计算流体力学是一门交叉科学。它是现代流体力学、计算数学和计算机科学相结合的产物。它以计算机为工具,应用各种离散方法,对近代流体力学中基础理论和工程应用问题进行数值模拟和分析,解决工程实践中各种流动问题,揭示新的流动规律,开拓新的流体力学方向。流体力学实验研究和理论分析成为建立计算流体力学计算模型的理论依据;偏微分方程理论和数值算法的发展为计算流体力学奠定了算法基础;超高速大容量巨型计算机不断涌现为复杂流动数值模拟提供了强大的计算工具。因此,计算流体力学发展是和相关学科发展密不可分的。

采用离散数值算法求解流体力学问题的思想早在 20 世纪初就由 Rechar 提出来了。当时,由于问题的复杂性和计算工具的落后,他的数值解法思想一直没有引起人们的重视。1928 年 Courant、Fredrichs 和 Lewy 发表了数值解法基础理论的经典论文<sup>[5]</sup>,严格地证明了采用有限差分算法求解连续的椭圆型、抛物型和双曲型方程组解的存在性和唯一性。该论文成为计算流体力学中有限差分算法发展的基础。随着人类进入航空时代,设计航空飞行器的理论基础——空气动力学逐步形成,在 20 世纪 40 年代第二次世界大战期间空气动力学得到迅速发展。20 世纪 60 年代人类进入太空时代,人造卫星、宇宙飞船和航天飞机的出现,标志着高速空气动力学已经达到完全成熟阶段,并进入了高超声速飞行时代。空气动力学发展为计算流体力学提供了应用背景,也为计算机广泛使用提供了需要。第一代电子计算机在 1946 年问世时,使用计算机对流体力学和其他相关学科中基础理论和工程应用问题进行数值模拟变成现实。1963 年美国学者 Harlow 和 Fromm 成功地使用当时的 IBM7090 电子计算机解决了二维柱体绕流问题,给出了尾流的计算结果和涡街的演变过程。当时美国著名数学家 Von Neumann 就曾经预言:“数值解法将可以取代解析解法,来解决流体力学中各种非线性问题”。计算流体力学理论和应用的发展完全证实了 Von Neumann 的这一预言。20 世纪 70 年代,人们根据生产实践的迫切需要,开始对能源开发、环境保护、减灾防灾等进行研究,提出了一些新的流体力学课题和研究方向,逐渐形成了海洋流体力学、环境流体力学、灾害流体力学等新兴学科分支。20 世纪 80 年代以来,自然界中的混沌现象、非线性不稳定现象一一被揭示,这些新兴学科分支的形成和发展,进一步推动了计算流体力学的发展。目前,流体力学仍在向前发展,产生了不少崭新的学科分支:微米和纳米尺度流体力学、湍流、流动控制、化学流体力学、多相流体力学和生物流体力学等。相信流体力学的发展一定会把计算流体力学推向一个新的时代。由此可以看出,计算流体力学的发展是和流体力学紧密相关的。流体力学是计算流体力学的基础之一,同时,流体力学的发展又不断推动着计算流体力学的发展。