

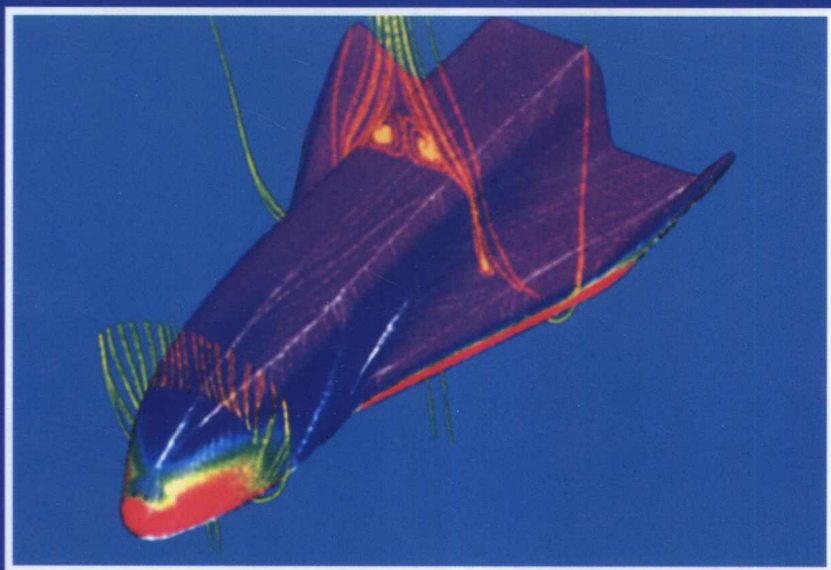
《近代空气动力学丛书》

计算流体力学

—差分方法的原理和应用

Computational Fluid Dynamics
—Fundamentals and Applications
of Finite Difference Methods

张涵信 沈孟育 著



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

计算流体力学——
差分方法的原理和应用
Computational Fluid Dynamics——
Fundamentals and Applications of
Finite Difference Methods

张涵信 沈孟育 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学:差分方法的原理和应用/张涵信,沈孟育著. —北京:国防工业出版社,2003.1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02854-1

I. 计... II. ①张...②沈... III. 计算流体力学
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 027812 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 16% 410 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模				
主任委员	黄 宁				
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎	
秘 书 长	崔士义				
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成	
(以姓氏笔划排序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树	
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟	
	何新贵	张立同	张汝果	张均武	
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安	
	侯正明	莫悟生	崔尔杰		

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961 年 4 月 12 日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1 号飞船实现了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于 1969

年7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指引下,由于国内空气动力

学部门和全国有关单位的大力协同,以及空气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日

近代空气动力学丛书编辑委员会 组成人员

主任委员	庄逢甘			
副主任委员	张涵信	崔尔杰	贺德馨	张仁杰
委员	王承尧	王政礼	邓学莹	田震
(按姓氏笔划为序)	乔志德	邬华谟	刘琯德	安复兴
	杨其德	杨岍生	李椿萱	吴芝萍
	吴望一	沈青	沈孟育	苗瑞生
	范洁川	俞鸿儒	蒋范	程厚梅
	舒玮	童秉纲		

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气

动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

计算流体动力学,英文名称为 Computational Fluid Dynamics,简称 CFD。它是利用计算机和数值方法求解满足定解条件的流体动力学方程以获得流动规律和解决流动问题的专门学问。计算流体动力学作为一门专门学科,大约是 20 世纪 60 年代形成的。它一出现,就得到了迅速发展,现在 CFD 已深入到与流动有关的各个技术领域。按照我们的观点,计算流体动力学的研究内容可用 5 个 M 和 1 个 A 来表述。第一个 M 是 Machine 的缩写,它表示计算机 Computer,这是进行流动计算研究必须具备的工具。当今并行计算机已大量出现,它的设计和运行与计算流体动力学的内容有密切关系。第二个 M 是 Mesh 的缩写,表示网格,有时人们也用 Grid 表示。在进行流动计算时,把流场划分成网格是必经的步骤,在此基础上,流动方程才可能被离散。现在网格生成已成为一个专门学问,贴体网格生成技术、叠合网格技术、搭接网格技术、结构和非结构混合网格技术等大量出现。第三个 M 表示 Method,即方法,这里有狭义与广义两种理解。其狭义理解,是指流体动力学方程的求解方法以及定解条件的处理方法。广义说法除包含狭义说法的内容外,还包括建立流动方程和定解条件,即形成被计算的数学问题的方法。在 CFD 中,方法研究是最活跃的,当前已提出了各式各样的计算方法,例如在气体动力学中,已发展了有限差分方法、有限元法、谱方法和样条函数法,在这四大类方法中,又有五花八门的离散格式。第四个 M 表示 Mechanism,即机理。利用 CFD 解决流动问题,特别是复杂流动问题,给出的是大量数据,有人称之为数据海洋。要从这大量数据中找出流动

机理和规律,这方面的研究是极为必要的。第五个 M 表示 Mapping,即作图,把计算结果按需要作出静态的或动态的图形或图像。第四、第五个 M 实际是 CFD 中后处理的内容,当今的发展也是丰富多彩的,目前已出现很多后处理软件系统,特别是虚拟技术的出现,给这方面的研究增添了活力。一个 A 表示 Application,即应用。以上五个 M 好比人的五个手指,将它们握在一起,就形成一个拳头,可用来解决各种流动问题。这里的应用有两方面的含义,一是用来解决各种工程上的流动问题,二是用来阐明流动自身的机理和规律。目前在这两个方面都有很大的发展。

计算流体动力学在我国学科设置的名称上叫做计算流体力学,按字面含义英文名应为 Computational Fluid Mechanics,这与 CFD 的英文名不一致。CFD 是国际上对计算流体动力学统一的名称缩写,为了和国际上统一,把计算流体力学的名称译为 CFD。在本书中,计算流体力学的名称也被采用,故在此特别说明。此外,有人将计算流体力学解决流动问题称为数值模拟(Numerical Simulation),这个名词在以后的研究中也采用。

20 世纪 60 年代以前,求解流体动力学方程的主要方法是解析分析。解析分析方法的优点是可以建立流动物理量之间的显式关系,揭示流动内部的机理和规律;缺点是很难求解复杂的流动问题。20 世纪 60 年代计算流体动力学出现以后,由于计算机技术、网格技术、计算方法和后处理技术的迅速发展,计算流体动力学求解流动问题的能力越来越高,现在几乎任何复杂的流动,只要定解条件和流动的控制方程可以正确提出,都可进行计算,并给出相应的计算结果。在这种情况下,解析分析被冷落。然而也出现了一些新的问题:

1. 对于复杂的流动问题,计算方法的有效性常常与流场的物理情况有关,如何根据流场的情况选择、改进或设计计算方法?

2. 当计算方法给定后,为了获得准确解,如何设计和确定网格及网格的结点分布?

3. 如何进行边界点的计算以适应内点计算的需求?

4. 对于复杂流动问题,计算数据已成为海洋。如何从数据海洋中揭示其流动机理和规律?

这些问题均与流动的物理特征相关,因此要解决它们必须开展物理分析研究。在 CFD 研究中,重视物理分析是非常必要的,也就是说,计算流体力学与分析研究必须结合起来。在 CFD 的发展历程中,有些成功的工作是建立在物理分析的基础上的,例如气体流动中的特征线方法、Murman-Cole 迎风差分方法以及 Jameson 的旋转差分方法都有很强的物理背景。在求解带激波的流动时,Godunov 的差分求解方法以及本书将要介绍的无波动、无自由参数和具有耗散性的差分方法(简称 NND 格式)也是根据物理分析建立的。近年来,由于已经认识到物理分析在 CFD 中的重要性,因而做了不少涉及上述问题的工作。CFD 与物理分析相结合,已成为计算流体力学发展的一个重要方向。

据我们所知,国内外已出版了不少计算流体力学的著作。这本书的特点是从物理分析出发研究计算流体力学,或者说将力学分析与数值模拟相结合来研究 CFD 的问题。作者将通过物理分析,提出设计数值计算方法的基本原则,从而根据这些原则,建立高精度、高分辨率的计算格式;通过物理分析,建立设计计算网格间距和结点数原则,从而根据这些原则给出与计算格式精度协调一致的网格布置;通过物理力学分析,利用边界条件,提出运用于流场计算的边界控制方程,从而可使用和内点计算精度一致的格式去求解;通过物理分析,揭示三维复杂黏性分离流动表面流态的拓扑结构规律以及横截面流态的拓扑结构规律,从而可利用这些规律从数据海洋中揭示流动的机理和特征,并进一步作出能反映机理、特征的流动图像。以上这些内容,均是根据作者的研究成果写成的。

本书第 2,3,4,9,10 章由张涵信编写,第 1,5,6,7,8 章由沈孟育编写,在编写过程中,得到了庄逢甘院士热情的关怀和帮助。邬

华谟教授、吴望一教授对本书的内容提出了许多很好的意见。第8章中关于非结构网格和混合网格部分为张来平博士编写。此外,叶友达、黎作武、袁先旭、王振亚、刘金合、谢昱飞诸博士分别校对各章并绘制了全部图表。在此向以上同志表示衷心的感谢。

由于水平限制,本书的错误难免,敬请读者提出批评,以便改正。

著 者

2001.12.5

目 录

第 1 章 流体力学的各级近似方程及其数学性质	1
1.1 流体力学的各级近似方程	1
1.1.1 可压缩牛顿流体二维非定常流动的 Navier-Stokes 方程	1
1.1.2 抛物化的 Navier-Stokes 方程	4
1.1.3 不可压缩牛顿流体二维非定常流动的 Navier-Stokes 方程	5
1.1.4 可压缩理想完全气体二维非定常绝热流动 的 Euler 方程	6
1.1.5 可压缩理想流体二维非定常跨声速无旋流动 的支配方程	6
1.1.6 可压缩理想流体二维非定常跨声速无旋流动 的小扰动方程	7
1.1.7 可压缩理想流体二维定常亚声速或超声速 无旋流动的小扰动方程	7
1.2 一阶拟线性偏微分方程组的分类	8
1.3 流体力学各级近似方程的类型	9
1.3.1 可压缩理想流体二维定常亚声速或超声速 无旋流动的小扰动方程	9
1.3.2 可压缩理想流体二维定常跨声速无旋流动 的小扰动方程	9
1.3.3 可压缩理想流体二维非定常跨声速无旋流动 的小扰动方程.....	10
1.3.4 可压缩理想流体二维定常跨声速无旋流动	

的支配方程·····	12
1.3.5 可压缩理想流体二维非定常跨声速无旋流动 的支配方程·····	12
1.3.6 可压缩理想完全气体二维定常绝热流动的 Euler 方程·····	15
1.3.7 可压缩理想完全气体二维非定常绝热流动 的 Euler 方程·····	17
1.3.8 可压缩理想完全气体二维定常绝热流动的 人工密度化的 Euler 方程·····	18
1.3.9 可压缩理想完全气体二维定常绝热流动的 人工压力化的 Euler 方程·····	20
1.3.10 不可压缩牛顿流体二维定常流动的 Navier- Stokes 方程·····	22
1.3.11 不可压缩牛顿流体二维非定常流动的 Navier-Stokes 方程·····	24
1.3.12 抛物化的可压缩定常 Navier-Stokes 方程·····	25
1.3.13 抛物化的可压缩非定常 Navier-Stokes 方程·····	30
1.3.14 可压缩黏性常比热完全气体二维定常流动 的 Navier-Stokes 方程·····	32
1.3.15 可压缩黏性常比热完全气体二维非定常流动 的 Navier-Stokes 方程·····	35
1.4 流体力学问题的定解条件的提法·····	38
1.4.1 椭圆型偏微分方程边值问题的提法·····	38
1.4.2 双曲型偏微分方程初值、边值问题的提法·····	39
1.4.3 抛物型偏微分方程初值、边值问题的提法·····	43
1.5 弱解与熵增条件·····	44
1.5.1 古典解·····	44
1.5.2 强间断的存在·····	44
1.5.3 弱解·····	45