

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

计算流体力学及应用

中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

《国防科研试验工程技术系列教材》
空气动力系统

计算流体力学及应用

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学及应用/中国人民解放军总装备部军事
训练教材编辑工作委员会编. —北京: 国防工业出版社,
2003. 1

(国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统)

ISBN 7-118-03026-0

I. 计... II. 中... III. 计算流体力学—教材
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 086479 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9 1/8 252 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1 - 2000 册 定价: 26.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委 员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 晔 陶有勤 郭詮水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺
刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清
桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

计算流体力学及应用

主 编 陈作斌

副 主 编 马明生 贺国宏

主 审 杨其德

编写人员 第 1 章 陈作斌 桂玉伟

第 2 章 马明生

第 3 章 马明生

第 4 章 庞宇飞

第 5 章 陈作斌

第 6 章 贺国宏

第 7 章 朱国林 王开春 张树海

第 8 章 贺国宏 王运涛

第 9 章 梁 杰

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业 40 年来的重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关、型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001 年 3 月

前 言

《计算流体力学及应用》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》中的一卷,主要介绍计算流体动力学的原理、方法和应用技术。全书共九章。第1章介绍计算流体动力学的基本方程及其发展历程;第2章、第3章介绍亚超声速流的有限基本解方法及其实际应用;第4章介绍计算空气动力学中的有限差分法和有限体积方法;第5章介绍计算网格生成技术;第6章介绍非线性速势方程的基本解法;第7章、第8章介绍不可压缩及可压缩的Navier-Stokes方程的数值解法;第9章介绍稀薄气体的蒙特-卡罗数值模拟方法。

本书是根据《国防科研试验工程技术系列教材》的性质及编写要求编写的。编写人员都是从事计算流体动力学的专家。全书内容丰富、深入浅出、理论联系实际,是一本供从事计算流体动力学技术人员阅读的专业书。

本书在编写过程中得到了中国空气动力研究与发展中心领导和计算空气动力学研究所的领导、机关及有关研究室的大力支持,在此表示感谢。

由于我们水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2002年3月

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了计算流体动力学的原理、方法和应用技术。其主要内容包括:计算流体动力学的基本方程及发展历程;流体动力学线性方程的求解及其应用;计算流体动力学的基本理论;计算网格生成方法;非线性速势方程的基本解法;不可压缩与可压缩的 Navier-Stokes 方程的数值解法;稀薄气体的蒙特-卡罗数值模拟方法等。

本书适用于大专以上学历、从事空气动力计算、研究与试验的工程技术人员和大专院校有关专业的师生学习参考。

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》

编号	教材名称
7-1	分离流与旋涡运动的结构分析
7-2	计算流体力学及应用
7-3	低速风洞试验
7-4	高速风洞试验
7-5	高超声速气动力试验
7-6	高超声速气动热和热防护
7-7	再入物理
7-8	高低速风洞气动与结构设计
7-9	高低速风洞测量与控制系统设计
7-10	高超声速试验设备设计
7-11	飞行器系统辨识学
7-12	模型自由飞试验
7-13	流动显示技术

ISBN 7-118-03026-0/O·189

定价:26.00 元

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 流体动力学基本方程	3
1.2.1 Navier-Stokes 方程	3
1.2.2 Navier-Stokes 方程的简化形式	6
1.3 基本方程的数值求解	8
1.4 计算流体动力学的发展	10
1.5 计算流体动力学的应用	14
参考文献	15
第 2 章 亚超声速流的有限基本解方法	16
2.1 概述	16
2.2 几种常见的基本解	19
2.2.1 源(汇)	19
2.2.2 偶极子	26
2.2.3 马蹄涡的诱导速度	35
2.2.4 几种特殊的亚声速基本解	40
2.3 亚声速涡格法	45
2.3.1 亚声速定常薄翼升力特性的计算	45
2.3.2 薄翼 - 圆柱机身组合体的计算	49
参考文献	57
第 3 章 基本解方法的实际应用	58
3.1 亚超声速通用的面元法	58
3.1.1 不可压缩公式的推导	58
3.1.2 可压缩流诱导速度公式的推导	63

3.1.3 气动模型	64
3.1.4 法向诱导速度	65
3.1.5 几何处理	68
3.2 诱导阻力的计算	70
3.3 亚声速机翼最佳弯扭形状的设计计算	73
3.4 超声速机翼弯扭设计	77
参考文献	79
第4章 计算空气动力学中的有限差分法和有限体积方法 ..	80
4.1 概述	80
4.2 有限差分法的基本步骤	81
4.2.1 建立方程及边界条件	81
4.2.2 网格划分及方程离散化	81
4.2.3 差分方程的建立	82
4.2.4 差分方程的求解	86
4.3 差分法的基本理论	87
4.3.1 收敛性	87
4.3.2 相容性	87
4.3.3 稳定性	88
4.3.4 Lax 等价定理	89
4.3.5 稳定性分析方法 (Von-Neumann 分析方法)	89
4.4 双曲型方程特征分析	93
4.4.1 特征线、依赖区和影响区	93
4.4.2 CFL 条件	95
4.4.3 一般形式的一阶线性双曲型方程特征分析	98
4.4.4 无粘气动力 Euler 方程及其分析	99
4.5 有限体积方法	109
4.5.1 守恒离散方法	109
4.5.2 有限体积法基本方法	112
4.5.3 二维有限体积法	117
参考文献	119

第 5 章 网格生成技术	120
5.1 概述	120
5.2 网格生成基本方法	123
5.2.1 代数网格生成	123
5.2.2 微分方程网格生成	126
5.3 网格分区与重叠网格技术	138
5.3.1 分区对接网格技术	138
5.3.2 重叠网格技术	142
5.4 非结构网格生成技术	147
5.4.1 Delaunay 三角化方法	147
5.4.2 阵面推进法	148
参考文献	149
第 6 章 非线性速势方程解法	152
6.1 概述	152
6.2 小扰动速势方程的差分方法	152
6.2.1 跨声速小扰动方程	152
6.2.2 跨声速小扰动方程的因式分解格式	159
6.3 全速势方程的数值解法	163
6.3.1 Jameson 的旋转差分法	163
6.3.2 全速势方程的有限体积法	168
参考文献	178
第 7 章 不可压缩 Navier-Stokes 方程求解	179
7.1 概述	179
7.2 不可压缩 Navier-Stokes 方程求解的压力修正方法	180
7.2.1 数值离散和差分方程的建立	181
7.2.2 压力修正算法	188
7.3 计算实例	191
7.4 虚拟压缩方法求解不可压缩流动	196
7.4.1 虚拟压缩方法	196
7.4.2 非线性波特征	198

7.4.3 虚拟压缩因子的选择	199
7.4.4 虚拟压缩流动渐近不可压缩流	201
7.5 计算方法	202
7.5.1 计算方程	202
7.5.2 数值离散方法	203
7.5.3 时间精确法计算非定常问题	204
7.5.4 边界条件	205
7.6 计算实例	206
参考文献	214
第 8 章 可压缩 Euler 及 Navier-Stokes 方程数值解	215
8.1 概述	215
8.2 MacCormack 显式差分法	217
8.3 Beam-Warming 因式分解格式	222
8.4 Jameson 有限体积格式	227
8.5 TVD 格式	231
8.5.1 TVD 的基本概念	231
8.5.2 全离散 TVD 格式	232
8.5.3 半离散 TVD 格式的充分条件	237
8.6 NND 格式	241
8.6.1 NND 格式的建立	241
8.6.2 NND 格式在气动方程求解中的应用	243
8.7 ENO 及 ENN 格式	248
8.7.1 ENO 格式的概念	248
8.7.2 ENO 格式的构造	250
8.7.3 ENN 格式	254
8.8 几种常用的隐式算法(时间方向离散)	257
8.8.1 近似因式分解方法	258
8.8.2 对角化算法	259
8.8.3 LU-ADI 算法	260
8.8.4 LU-SCS 算法	261