

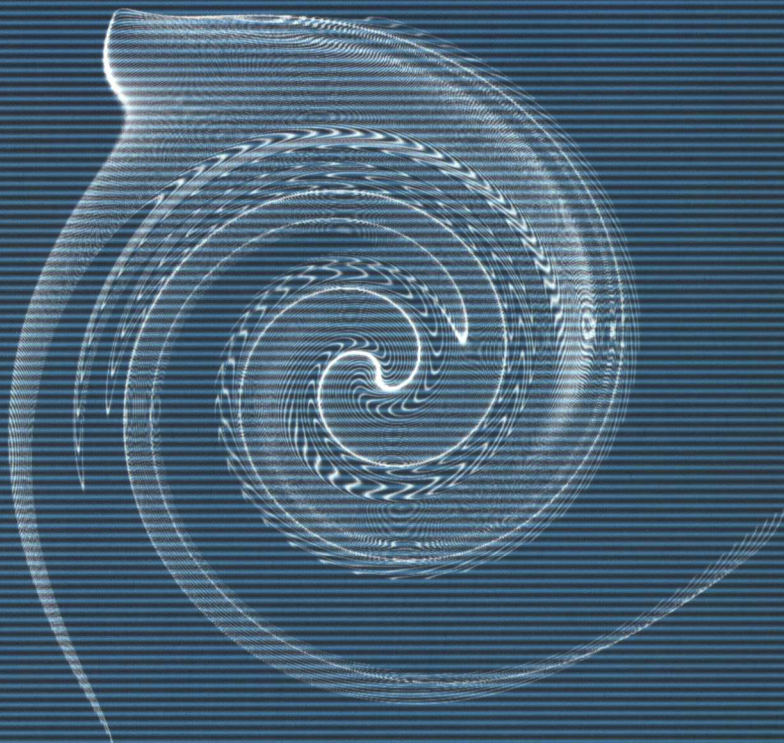
动力机械及工程热物理



国防科工委『十五』规划教材

气体动力学

●王保国 刘淑艳 黄伟光 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·动力机械及工程热物理

气 体 动 力 学

王保国 刘淑艳 黄伟光 编著

北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书为国防科工委“十五”重点教材。全书贯穿了基础、实用、简练、前沿这四条原则,深入浅出,构思巧妙。在内容讲解上,注重物理概念清晰、数学推导严谨,尽可能将严密的数学方法与工程实际相结合,引导学生用现代数值计算方法去求解气体动力学的基本问题。全书分10章,涵盖了气体动力学的主要内容,从低速到高速,从一维到三维流动,从亚声速到高超声速的流动问题,特别讲到了跨声速、高超声速及气动声学基础的内容,填补了现有教科书中的缺憾。

图书在版编目(CIP)数据

气体动力学/王保国,刘淑艳,黄伟光编著. —北京:北京理工大学出版社,2005.8

国防科工委“十五”规划教材. 动力机械及工程热物理

ISBN 7-5640-0445-2

I. 气… II. ①王…②刘…③黄… III. 气体动力学-高等学校-教材
IV. O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 009311 号

气体动力学

王保国 刘淑艳 黄伟光 编著

责任编辑 向继红

责任校对 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(发行部)

<http://www.bitpress.com.cn>

E-mail:chiefedit@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:44 字数:922千字

2005年8月第1版 2005年8月第1次印刷

印数:2000册.

ISBN 7-5640-0445-2 定价:62.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:王泽山 陈懋章 屠森林

编 委:	王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
	乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
	杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光祜
	陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
	贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
	郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入二十一世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



序

气体动力学的发展经历了三个重要的历史时期,一是从 19 世纪下半叶到 20 世纪 30 年代,这是气体动力学的初步奠基阶段。这个时期低速飞机的设计技术已日趋成熟,由杜朗(W. F. Durand)主编的六卷本《空气动力学理论》(Aerodynamic Theory)丛书已于 1934 年开始出版,这是一套世界性权威丛书,普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)和卡门(T. von Karman)等都参加了该丛书的撰写;二是从 1935 年至 20 世纪 60 年代初,这是气体动力学高速流动大发展的阶段,它标志着人类进入了超声速时代。正是在这个时期里,由查雷(J. Charyk)任主编的 12 卷本《高速空气动力学与喷气推进》(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书由普林斯顿大学出版,一百多位当时在美国的第一流科学家,例如卡门、钱学森、林家翘、郭永怀等都是该丛书的作者;三是从 20 世纪 60 年代至今的近 50 年,在这个时期里载人的和不载人的高超声速飞行器已成为现实,而且航空航天事业的迅速发展,拉动了气体动力学各方面的研究工作,特别是跨声速流场以及高超声速流场的数值计算。大量的研究工作表明:在高超声速气体动力学中,高温热效应十分突出,气动热力学(Aerothermodynamics)的研究,尤其是数值计算技术的飞速发展极大地丰富了气体动力学的基本内容。显然,这些近 50 年新近发展的前沿内容应该反映到我们的教科书中。

本书是供工程热物理等专业本科生使用的一本风格别致的基础性教科书。全书贯穿了基础、实用、简练、前沿这四条原则,深入浅出、构思巧妙,充分表明了作者们的造诣深厚与匠心独运。在内容的讲解上,注重物理概念清晰、数学推导严谨,尽可能把严密的数学方法与工程实际相结合,密切关注以实际问题为背景的各种力学模型条件的分析,引导学生用现代数值计算方法去求解气体动力学的基本问题。全书共分 10 章,涵盖了气体动力学的主要基本内容,它涉及从低速到高速,从一维到三维流动,从亚声速、跨声速、超声速到高超声速的流动问题;特别是跨声速流动、高超声速流动以及气动声学基础这三章内容在现有的气体动力学教科书中是不多见的。

本书的第一作者王保国博士是数学、力学功底深厚的中青年气体动力学学术



带头人之一。他治学严谨,处理问题强调物理直观,科学研究注重联系实际。大学毕业后,他在国防科工委某研究机构工作过8年,担任我国某型歼击飞机发动机的延寿改型工作。他深入制造工厂、车间、试车台并参加飞机试飞,处理过大量工程问题。他在中国科学院学习与工作过16年,在清华大学任教授10年,在理论与实践两方面都经受过比较全面的训练并且吸取了众家精华。他曾在清华大学工程力学系为流体力学专业与工程热物理专业的本科生讲授过近10年的气体动力学课程,深得同学们的厚爱并荣获清华大学教学优秀奖。他在AIAA、ASME、力学学报、应用数学和力学、空气动力学学报、工程热物理学报等国内外重要学术刊物上发表过160余篇文章,其中许多文章被SCI、EI检索收录,得到了国内外同行们的认可与关注,而且多次获奖。第二作者刘淑艳教授一直从事流体力学与气体动力学的教学与研究工作。她在增压器气动设计方面颇具特色并获得过国家发明奖。第三作者黄伟光研究员是在国外留学9年之后于1991年回国创业的工程热物理界的新秀,他是中国科学院工程热物理研究所所长与气动热力学的学科带头人,是中国科学院知识创新工程项目的首席科学家。他一直从事高速与高超声速气动与燃烧方面的研究,指导着多名博士生与硕士生。他在非定常流动数值模拟,尤其是叶轮机械动静叶干扰方面的研究获得了国内外同行们的高度评价。三位作者密切合作,优势互补,共同编著了这部叙述清晰、论证细致、内容丰富、贴近前沿的基础性教材。毫无疑问,它的出版必将丰富与完善我国气体动力学教材的建设。

齐荫贵

2003年9月于中国科学院



前 言

本书是遵照国防科工委“十五”重点教材建设编写大纲的要求,考虑到目前动力机械及工程热物理学科的学生已修过流体力学基础课程,在这个基础上为 80 学时气体动力学课程编著而成。本教材注重揭示气体流动的基本力学原理,注意阐明典型处理方法的基本思想,密切关注气体动力学学科的新进展,力求采用现代观点与现代数值计算技术去叙述那些经典性的基本内容,反映当代气体动力学数值计算的新趋势。全书共分 10 章,反映了气体动力学从低速到高速,从一维到三维流动,从亚声速、跨声速、超声速,一直到高超声速流动的基本内容,并对气动声学,尤其是计算气动声学基础作了简明扼要的阐述。显然,跨声速流动、高超声速流动以及气动声学基础这三章内容在现有的气体动力学教科书中是不多见的。在内容的讲解上,力求物理概念清晰,数学推导严谨,尽可能把严密的数学方法与工程实际相结合,数学的描述与力学原理相联系,密切关注以实际问题为背景的各种力学模型条件的分析,注意引导学生联系工程应用,用现代数值计算方法去求解气体动力学的基本问题。全书共列出近千篇参考文献,这对于学有余力的读者是一个很好的文献索引。在每章书后习题的编写中,除了其中一小部分是参考国内外教科书之外,其余相当多的题目是编著者自己根据所讲内容及从事科学研究的实践之中提炼、升华而编写的。毫无疑问,这些题目对加深理解所讲授的基本内容,密切与现代科研方向的联系,提高学生解决实际问题的能力是一个很好的基本训练与基本练习,它不仅使同学们完成了课后作业,更重要的是从解题之中获得了更多的新思想、新知识、新内容、新方法。

三位作者万分感谢中国科学院力学研究所卞荫贵教授对本书编写所给予的关心与支持。卞先生早在 20 世纪 60 年代就曾在中国科学技术大学主编并出版了《理想气体动力学》,并亲自为学生讲授这门课程;童秉纲院士等在 1990 年出版了《气体动力学》,陈懋章院士出版了《粘性流体动力学基础》,这三本书是我们在本书编著过程中最重要的参考书。这里我们衷心感谢三位前辈长期以来对我们工作的支持与厚爱。

本书可作为理工科院校工程热物理专业、力学专业、航空航天专业、燃气轮机



内燃机专业、热能与动力工程专业及理工科有关专业本科生的气体动力学课程教材,也可供有关教师、科技人员及研究生参考。目录中注以*号的章节,对本科生可不作要求,但可作为研究生课程的讲授内容。

由于作者的水平有限,本书难免存在缺点和不足之处,敬请广大读者及专家给予批评指教。E-mail:bguowang@bit.edu.cn; liushy@bit.edu.cn; huangwg@mail.etp.ac.cn。

编著者

2003年8月

目 录

第 1 章 可压缩流体的热力学、流体力学基础及有关数学工具	1
§ 1.1 气体动力学发展概况及研究范畴	1
§ 1.2* 场论基础与张量计算初步	8
§ 1.3 物理场在绝对与非惯性相对坐标系中的转换关系	21
§ 1.4 流体力学基本方程组的积分与微分形式	24
§ 1.5 流体运动的热力学基础	33
§ 1.6 气体的粘性系数、热传导系数与扩散系数	42
§ 1.7 声速、马赫数及弱扰动在气流中的传播	44
§ 1.8 滞止参数、临界参数及气动函数	47
§ 1.9 几个重要的特殊方程	54
参考文献	69
习 题	73
第 2 章 膨胀波、压缩波和激波	76
§ 2.1 膨胀波、压缩波的形成及普朗特-迈耶流动	76
§ 2.2 激波的性质及激波前后的参数关系	87
§ 2.3 正激波与斜激波	98
§ 2.4 激波、膨胀波的反射和相交	112
§ 2.5 超声速圆锥绕流及轴对称锥型流的求解	117
§ 2.6 超声速进气道的激波系以及排气喷管的波系分析	122
§ 2.7 压气机及涡轮中的激波与膨胀波	128
参考文献	148
习 题	149
第 3 章 可压缩一维定常流动	152
§ 3.1 广义一维流动的基本方程组	152
§ 3.2 一维定常流动的基本关系	160
§ 3.3 几个制约因素在一维定常流基本方程中的数学表达及其影响系数	163
§ 3.4 变截面一维定常无粘、绝能流	170
§ 3.5 等截面一维定常绝热摩擦管流	184
§ 3.6 等截面无摩擦一维定常加热（或冷却）管流	197
§ 3.7 变流量管流	209
§ 3.8* 变比热容气动函数及其应用	214



参考文献	219
习 题	219
第 4 章 可压缩一维非定常流动	222
§ 4.1 可压缩、无粘、非定常基本方程组的数学结构及一维流动	222
§ 4.2 守恒变量与原始变量基本方程组间的相互转换及特征分析	227
§ 4.3* 双曲型守恒律方程的弱解及熵函数、熵通量、熵条件	235
§ 4.4 双曲型偏微分方程初、边值问题的提法	245
§ 4.5 广义一维非定常流动的特征线和相容关系	252
§ 4.6 非定常一维均熵流动及分析	258
§ 4.7 波的相互作用	267
§ 4.8 有间断面的一维非定常流动	271
§ 4.9 激波管及流动分析	295
参考文献	300
习 题	301
第 5 章 粘性流动与湍流模型基础	307
§ 5.1 粘性流动的一般概述	307
§ 5.2* 基本方程组的几种通用形式及粘性项的计算	313
§ 5.3* 粘性流体力学方程组的数学性质及定解条件	327
§ 5.4 N-S 方程的几个精确解	336
§ 5.5 剪切层与边界层的概念以及相似解存在的条件	346
§ 5.6 基于 I-S 变换的二维可压缩层流边界层求解方法	356
§ 5.7 不可压缩与可压缩湍流流动的基本方程	359
§ 5.8 定常二维湍流边界层方程及动量积分关系式解法	371
§ 5.9 湍流模型基础	377
参考文献	382
习 题	385
第 6 章 二维及三维亚声速定常流动	390
§ 6.1 流函数方程及势函数方程	390
§ 6.2 小扰动线化理论	400
§ 6.3 沿波形壁流动的二维精确解	404
§ 6.4 亚声速绕薄翼型定常流动的相似律	407
§ 6.5 亚声速定常、无旋、均熵流动的速度图方法	411
§ 6.6 Karman—钱学森的近似方法	417
§ 6.7 机翼与叶栅绕流的尾缘条件	418
参考文献	428
习 题	430



第 7 章 二维及三维跨声速定常流动	434
§ 7.1 跨声速流动的一般论述	434
§ 7.2 三维跨声速流动的相似律	438
§ 7.3 收-扩喷管的二维定常跨声速流动	446
§ 7.4 跨声速 Tricomi 方程	453
§ 7.5 跨声速流函数方法及人工可压缩性	456
§ 7.6 二维与三维跨声速势函数方程的数值解法	458
§ 7.7 跨声速计算中高效率、高分辨率算法的概述	465
参考文献	474
习 题	477
第 8 章 二维及三维超声速流动	482
§ 8.1 定常二维超声速无粘、无旋、等熵流动的特征线方法	482
§ 8.2 定常二维超声速、无粘、等熵、有旋流动的特征线方法	486
§ 8.3* 无粘、定常三维等熵超声速流动中的特征面及相容性关系	489
§ 8.4* 多个自变量一阶方程组的特征分析	495
§ 8.5 平面定常超声速流动特征线法的几种提法	500
§ 8.6 特征线方法数值计算的预估与校正	501
§ 8.7 喷管内超声速流场的分析及相关计算域的确定	506
§ 8.8 超声速流动的空间推进求解方法	508
参考文献	518
习 题	521
第 9 章 高超声速流动	527
§ 9.1 高超声速流动的特征	527
§ 9.2 高超声速流动的斜激波以及膨胀波关系	531
§ 9.3 高超声速无粘流动分析	535
§ 9.4 高超声速粘性流动分析	544
§ 9.5 高温效应以及高温无粘气体的平衡流与非平衡流动	557
§ 9.6 高温粘性气体动力学基本方程组及守恒形式	569
参考文献	573
习 题	575
第 10 章 气动声学基础	577
§ 10.1 运动介质中声学的基本方程及声场中的能量关系	578
§ 10.2 运动介质中的广义 Lighthill 方程及其解	581
§ 10.3 声辐射点源的基本解以及相关的 Green 函数	586
§ 10.4 喷流的声场及降噪分析	591
§ 10.5 压气机与涡轮的噪声以及降噪分析	594
§ 10.6* 计算气动声学中的高精度、高分辨率、保持色散关系的差分格式	595



参考文献	632
习 题	637
附录 气体动力学函数表	640
表 1 二维超声速等熵流动函数表 ($\gamma=1.4$ 的量热完全气体)	640
表 2 正激波前后气流参数表 ($\gamma=1.4$ 的量热完全气体)	643
表 3 斜激波前后气流参数表 ($\gamma=1.4$ 的量热完全气体)	648
表 4 (a) 一维等熵流气动函数表 ($\gamma=1.4$)	661
表 4 (b) 一维等熵流气动函数表 ($\gamma=1.33$)	668
表 5 等截面绝热摩擦管流 ($\gamma=1.4$)	674
表 6 等截面管道有热交换无摩擦的定常流动 ($\gamma=1.4$)	676
表 7 (a) 垂直于主流的添质流动 ($\gamma=1.4$)	679
表 7 (b) 垂直于主流的添质流动 ($\gamma=1.2$)	682
表 8 (a) 空气主要组元的量纲为 1 的比定容热容	683
表 8 (b) 平衡空气的压缩因子 (参考 NACA TN 4150)	684
表 8 (c) 平衡空气的量纲为 1 的声速	684
表 8 (d) 纯空气的一些化学反应速率常数	685
表 8 (e) 平衡空气的粘性系数 μ/μ_0	685
表 8 (f) 平衡空气的冻结热传导系数 k_t/k_0	686
表 8 (g) 空气成分的二元扩散系数	686
表 8 (h) 空气主要组元的一些光谱数据	687
表 9 地球标准大气层表	687
表 10 气体常数表	689
表 11 普适物理常数表	689

第1章 可压缩流体的热力学、 流体力学基础及有关数学工具

由于动力机械及工程热物理学科的学生是在修完流体力学基础、工程热力学以及高等数学与工科工程数学之后学习气体动力学这门课程的，因此本章针对气体动力学问题中将要涉及的一些流体力学、热力学的基础知识以及相关的高等数学方面的工具作一简明扼要的复习，个别地方略有提高。虽然本章主要是复习，但却是全书的基础。

§ 1.1 气体动力学发展概况及研究范畴

1.1.1 气体动力学研究的对象及特点

气体动力学 (Gasdynamics) 也叫可压缩流体力学，它是流体力学的一个分支，主要研究气体在其可压缩性呈显著作用时的流动规律以及气体与周围物体之间的相互作用（例如力和热的作用等）。经典气体动力学是流体力学和经典热力学相结合的一门科学，它主要研究气体的亚、跨、超声速流动问题；近代气体动力学除了研究亚、跨、超声速流动之外，还应该包括高超声速 (Hypersonic, 我国著名科学家钱学森先生认为^[1]这时的马赫数 $Ma \geq 5$) 的流动。当飞行器以高超声速再次进入大气层时，它与稠密大气层相互作用，在飞行器头部周围产生一个弓形的强激波。由于粘性耗散效应和激波强烈压缩，动能中的一部分转变为激波层内气体的内能，因此空气穿过头部激波时被加热、温度突然升高，典型的高超声速飞行器头部区域的气体温度高达 10 000 K 以上，这使空气分子产生离解和电离并发生化学反应，所以研究这类流动问题将涉及到流体力学、化学热力学、化学动力学、统计物理和量子物理等方面的知识，冯·卡门 (Von Karman) 还特意定义这类流动为“气动热化学” (Aerothermochemistry) 问题^[2]。

研究可压缩气体的流动是以流体力学与热力学中的一些基本物理定律为基础，其控制方程组主要来自四个方面，即

- ① 运动学方面：质量守恒定律；
- ② 动力学方面：牛顿 (Newton) 第二定律（即动量定理）；
- ③ 热力学方面：能量守恒定律（即热力学第一定律）以及熵方程（即热力学第二定律）；
- ④ 气体的物理和化学属性方面：例如气体状态方程、气体组元间的化学反应速率方程、



气体的输运机理和对应的输运系数（如扩散系数、粘性系数以及热传导系数）等。

由上面四个方面组成的基本方程组再加上给定求解域边界上气体物理量应满足的初始与边界条件，便构成一个非线性（拟线性）偏微分（或积分）方程组^[3~5]。显然，这个方程组在数学上的解析与数值求解都是十分困难的。因此，解决气体动力学问题便产生了三种方法：一是实验，二是理论分析，三是数值模拟计算。实验研究能提供许多感性知识，使人不断深入物理现象，能使研究者从大量定性和定量的资料中分析出流动的规律来，从而为理论研究与数值计算提供理论模型。理论研究则是运用基本概念、定律和数学工具，抓住问题的主要作用因素，选取某种抽象出来的模型，作定量的分析，从而获得规律和结果，给出所研究问题的解析解或简化方程。然而，由于数学分析发展水平的限制，理论分析研究方法往往只局限于比较简单的理论模型，不能满足实际流动问题的需要。20 世纪 60 年代以来，随着电子计算机和一系列有效近似计算方法^[6]，如有限差分法、有限元法、有限体积法和谱方法等的发展，使数值方法在气体动力学研究方法中的作用和地位不断提高，并且已成为与实验研究、理论分析并列的研究方法^[7]。数值方法能够解决理论分析研究无法解决的复杂流动问题，和实验相比，所需的费用和时间都比较少，有些流动，例如现代跨声速高压压气机转子叶片叶尖与机匣环壁间的复杂间隙流动^[8]，在实验室里进行有困难，但采用数值计算方法便能很方便地对其进行研究，可以得到这种复杂流动的拓扑结构。当然数值方法也有其局限性，对于一个复杂的物理问题，要建立一个正确的数学方程（或模型），特别是对工程热物理学科中复杂的流动问题如燃烧、多相流、湍流等，还必须与实验研究以及理论分析方法相结合。更重要的是气体动力学中所求解的大都是非线性偏微分（积分）方程组，其数值方法的现有数学理论尚不够充分，严格的稳定性分析、误差估计和收敛性证明等理论工作的发展还跟不上数值模拟方法的进展。虽然关于广义解惟一存在性等问题的严格数学理论已取得了长足进展，但还不足以对一些复杂流动的求解问题给出明确的回答^[9]。所以实验研究、理论分析和数值模拟方法是互相依赖、互相促进的，它们是研究气体动力学的三种基本方法。

1.1.2 气体动力学的发展概况

气体动力学的发展大体上可分成三个阶段：

第一阶段，19 世纪下半叶—20 世纪 30 年代，这是气体动力学的初期研究阶段。这一时期的工业背景是 19 世纪下半叶，蒸汽机、炮弹的爆炸技术的发展都涉及气体流动的可压缩性问题。1903 年莱特兄弟（W.Wright 和 O.Wright）设计制造了带动力的载人飞机并试飞成功，从此开创了飞机飞行的纪元。随着飞机飞行速度的不断提高，动力机械中绕过涡轮机叶栅蒸汽（或燃气）的压力、速度和温度不断提高，炸药爆炸产生的爆轰波强度不断增强，都有力地推动了气体动力学的迅速发展。在这个时期，创立了一系列经典理论，其中代表性的有：黎曼（Riemann, 1860）发表了关于有限振幅波在空气中传播的重要论文，兰金



(Rankine, 1870) 和雨贡纽 (Hugoniot, 1887) 提出了激波基本理论。同一时期, 雷卡切夫 (М.А. Рыкачев, 1871) 提出了测定旋转的螺旋桨升力的方法; 马赫 (E. Mach, 1887) 研究了抛射体以超声速运动时产生的波, 得到了马赫角关系。其后阿克莱 (J. Ackeret, 1929) 把流速与声速之比命名为马赫数; 在此期间, 儒可夫斯基 (Н.Е. Жуковский) 发表了一系列著作, 其中包括“飞行原理”(1890)、“论鸟类的飞翔”(1892)、“航空理论基础”(1912)、“飞机空气动力学计算”(1917)、“飞机纵向稳定性的动力学研究方法”(1920)等。另外, 瑞利 (Rayleigh, 1896) 发表了“声学理论”; 恰普雷金 (С.А. Чаплыгин) 发表了“论气体射流”(1902)、“论平面平行流作用在物体上的压力”(1910)、“翼栅理论”(1914)以及“单翼机机翼的一般理论”(1922)等; 普朗特 (Prandtl) 和迈尔 (Th. Meyer) 1908年提出了斜激波和膨胀波理论; 库塔 (W. M. Kutta, 1902) 和儒可夫斯基 (1906) 分别独立地提出了特殊的与一般的库塔-儒可夫斯基定理和假定; 1910年布拉修斯 (H. Blasius) 与恰普雷金分别独立地提出一般二维物体受力公式, 从而建立了完整的二维升力理论; 关于圆锥激波的求解问题, 则先由布泽曼 (Busemann, 1928) 提出图解法, 后又由泰勒和马可尔 (G.T. Taylor & Maccoll, 1993) 提出数值解。拉瓦尔 (de Laval, 1882) 发明了收缩扩张形喷管, 其后斯多道拉 (Stodola, 1903) 以及普朗特和迈尔 (1908) 观测了这种喷管的流动特性; 另外, 小扰动线化方法、特征线方法和速度图方法也都在 20 世纪初相继问世。泰勒和马可尔在“可压缩流体力学”一文中总结了上述一系列奠基性成果并发表在杜朗 (W.F. Durand, 1935) 主编的《空气动力学理论》丛书^[10]第III卷中。这套丛书共六卷, 是美国戈根海姆基金会资助的。著名力学家普朗特、泰勒及冯·卡门等均为该丛书撰写了重要章节。1932年兰姆 (Lamb, H) 出版了《理论流体力学》第六版^[11]; 1934年普朗特和蒂金斯 (Tietjens, O.G.) 出版了《流体与空气动力学基础》^[12]; 四年后, 戈尔茨坦 (S. Goldstein, 1938) 主编了两卷本的《流体力学新发展》^[13]; 另外, 考夫曼 (W. Kaufmann) 也分别在 1931 和 1934 年出版了《应用流体力学》并被选为德国高等学校教科书。在压气机和涡轮的气体动力学方面, 凯勒和马克 (C. Keller & L.S. Marks, 1937) 出版了《轴流风扇性能和理论分析》^[14]; 斯贝哈克 (W. Spannhake, 1934) 出版了《离心泵、涡轮机械及喷气推进器》^[15]等; 最后, 特别应指出的是, 1935 年在罗马召开了第五次沃特学术会议 (Volta Congress), 讨论了航空中的高速流动问题, 普朗特、冯·卡门、布泽曼、泰勒等先辈均出席了该会, 使这次会议成为通向近代气体动力学的里程碑。

第二阶段, 20 世纪 30 年代—20 世纪 60 年代, 这是气体动力学的大发展时期。首先, 普朗特 (1904 年) 提出了一个突破性的重大见解, 他认为流场可划分为两个区域处理: 远离物面的区域用无粘理论处理, 贴近物面的一层流动区域作粘性计算, 在两个区域的边界上物理参数相匹配, 即著名的边界层理论^[16]。它为第二阶段气体动力学中粘性理论的研究开辟了一条新的发展之路, 从此才使气体动力学真正地服务于飞机和叶轮机械等领域的气动设计。从第一次世界大战到 20 世纪 30 年代末期第二次世界大战开始, 这是亚声速飞机成熟的时期, 也是低速空气动力学对航空事业做出重大贡献的时期。第二次世界大战期间及战后,