

高等学校教材

气体动力学

第2版

童秉纲 孔祥言 邓国华 编著

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是在 1990 年出版的《气体动力学》(第 1 版)的基础之上,按照工程力学专业气体动力学课程教学要求及国家相关标准和有关规定进行修订的,并汲取了不少高校院所授课专家提供的修订意见和建议。

本书注重揭示气体流动的基本力学原理,并力求用现代的观点来阐述;在讲述典型的气体动力学方法的同时,注意反映当代数值计算的趋势,并适当联系工程应用。

本书共 9 章,内容包括:基本概念和预备知识,理想气体运动的基本方程组,气体的一维定常流动,膨胀波和斜激波,理想气体定常势流的线化方法,定常超声速流动的特征线法,一维不定常流动,跨声速流动,高超声速流动引论。

本书可供理工科工程力学专业的本科生作为教材之用,亦可供工科有关专业的气体动力学课程作为教材之用,并可供有关教师、科研人员和工程技术人员参考。

本书第 1 版获 1995 年国家教委优秀教材一等奖、1998 年教育部科技进步二等奖。

本书第 1 版获 1995 年国家教委优秀教材一等奖、1998 年教育部科技进步二等奖。

图书在版编目(CIP)数据

气体动力学 / 童秉纲, 孔祥言, 邓国华编著. -- 2 版. -- 北京: 高等教育出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-04-034818-7

I. ①气… II. ①童… ②孔… ③邓… III. ①气体动力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 144354 号

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	三河市华润印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×960mm 1/16	版 次	1990 年 5 月第 1 版
印 张	30.75		2012 年 7 月第 2 版
字 数	560 千字	印 次	2012 年 7 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	47.50 元
咨询电话	400-810-0598		

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 34818-00

第2版前言

本书第1版于1990年出版,1996年重印,至今已有20多年的使用经历。它被国内许多高校列为教材或主要参考书,也被有关的科研单位列为继续学习的教材。它受到专家和授课教师的广泛好评,并得到广大读者的青睐。

本书被大家认同的特色可归纳为:(1)内容丰富精炼,深入浅出,阐述气体流动的力学原理不但精辟,且有独到之处,对流动物理现象的揭示和描述非常清晰;(2)在写作风格上体现了启发式,注重指明研究问题的思路,将基本理论、典型方法和解题应用结合起来;(3)用现代的观点来叙述经典内容,论述严谨,文字准确流畅。

由于以上特色,本书第1版曾获1995年国家教委优秀教材一等奖和1998年教育部科技进步二等奖。

本次修订,全书内容和知识体系未作变动,仅按1993年发布的《量和单位》(GB 3100~3102-93)系列国家标准及有关规定,规范了书中量和单位的名称、符号及外国人名的中译文,修改了少量文句,并对数表和习题中存在的疏漏作了修正。修订过程中吸收了不少高校院所授课专家提供的意见和建议,恕不一一赘述,在此向他们一并表示感谢。

本次的修订工作是在童秉纲院士的指导下,由中国科学院研究生院鲍麟副教授完成的,作者要衷心感谢中国科学技术大学的徐立功教授,他精心审阅了全稿,提出了许多宝贵意见和建议,使本书得以增色。

作者

2011年9月

第 1 版前言

本书是在中国科学技术大学近代力学系多年来使用的《气体动力学》讲义的基础上,按照国家教委高等工业学校工程力学专业教材委员会制订的气体动力学教材基本要求,并根据 1987 年 3 月在天津召开的“流体力学教材评议会”对本讲义的修改建议,重新编著而成的。

按照工程力学专业气体动力学课程的教学要求,本教材注重于揭示气体流动的基本力学原理,阐明典型的处理方法,并适当联系工程应用。鉴于气体动力学学科的新进展,我们力求用现代的观点来叙述那些经典性的基本内容;同时注意反映当代数值计算的趋势;并引入高温气体非完全气体效应的概念。读者可以发现,跨声速流动和高超声速流动这两章的内容,在现有气体动力学教科书中是不多见的。在讲解问题时,我们还力求使数学推导严谨,物理概念清晰,达到必要的深度和广度。本书取材的背景不仅涉及飞行器的外部流动问题,而且以相当篇幅介绍内部流动问题,另外,还选择了少量经典的非航空气体动力学问题。

本书可供理工院校力学专业作为本科生教材,也可供有关的各类工程专业以及理科专业的本科生和研究生作参考书,还可供有关专业的教师、科研人员和工程技术人员参考。

本书由童秉纲、孔祥言、邓国华编著,童秉纲任主编,其中孔祥言编写、整理了第五、六、七、八各章及相应的习题;童秉纲编写、整理了第一、二、三、四、九各章;邓国华合作编写、整理了第一、二、三、四、五各章并编出其余习题和数表。全书由张炳暄教授作了精心审订,在书中反映了他的大量的建设性意见。

中国科学院力学研究所的卞荫贵教授 20 世纪 60 年代曾在中国科技大学主编和讲授《理想气体动力学》。本书部分章节仍保留当年讲义的某些特色。在此,我们对卞先生表示衷心的感谢。此外,在近两年的编写过程中,天津大学周恒、清华大学沈孟育、北京大学是勋刚等教授以及中国科学技术大学庄礼贤、尹协远、马晖扬等诸位同事曾对本书提出不少宝贵意见,我们也一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,本书难免存在不少错误和不足之处,请广大读者及时给予指正。

作 者

1989 年 9 月

主要符号表

a_i	反应物的计量系数
b	翼型的弦长
B	$=\sqrt{Ma_\infty^2-1}$ (超声速流)
c	声速
c_i	混合气体中组元的质量比数
c_p, c_v	比定压热容和比定容热容
C_D, C_L	阻力系数和升力系数
C_M, C_p	力矩系数和压力系数
f	单位质量的力; 摩阻因数; 分子的自由度数
f, F	比亥姆霍兹自由能和亥姆霍兹自由能
F	冲量函数
F_D	阻力
F_L	升力
F_N	法向力
g, G	比吉布斯自由能和吉布斯自由能
h, H	比焓和焓
i	$=\sqrt{-1}$
K	体积模量; 化学反应平衡常数
L	特征长度
m	质量
$m_A = \rho V$	比流量密度
M	摩尔质量; 力矩
Ma	马赫数
n	摩尔数(物质的量)
p	压力
q, Q	质量热量和热量
\dot{q}, \dot{Q}	单位质量和总质量的加热率
q_m	质量流量

II 主要符号表

R	气体常数
Re	雷诺数
R_0	普适气体常数
s, S	比熵和熵
t	时间;翼型厚度
T	热力学温度
u, U	比内能和内能
U	转化流速
v, V	扰动速度和速度;比容和容积
w, W	下洗速度和复速度($=V_x - iV_y$);单位质量气体作的功和功
x, y, z	直角坐标系
x_i	混合气体中组元的摩尔比
X_i	混合气体中的组元
$[X_i]$	混合气体中组元的摩尔密度
f_x, f_y, f_z	单位质量的力的分量
z	$=x+iy$ 复变数
Z	真实气体的压缩因子
α	攻角
β	$=\sqrt{1-Ma_\infty^2}$ (亚声速流);激波角
γ	比热比
Γ	环量;速度面上特征线
δ	锥、楔半顶角;边界层厚度
ϵ	小参数
θ	气流偏转角
λ	特征线斜率;量纲一的速度 $\lambda=V/c^*$
μ	马赫角;质量化学势;黏度
ν	运动黏度
ξ, η, ζ	对应于 x, y, z 方向的积分变量
ρ	密度
x, r, θ	柱坐标系
σ	面积
τ	体积;切应力;流体的可压缩系数;细长体的特征参数
φ, Φ	扰动速度势和速度势
χ	后掠角;复速度势($=\Phi+i\Psi$)
ψ, Ψ	流函数

Ω	涡量($=\nabla \times \mathbf{V}$)
角标	
0	驻点参数; 0 族特征线
1, 2	激波前后参数; I, II 族特征线
∞	来流参数
\pm	分别对应于上下翼面; I, II 族特征线
*	喷管喉部参数
com	可压缩的
cr	临界值
inc	不可压缩的
n	法向
p	等压过程
r, θ	径向分量和周向分量
s	等熵过程
t	切向
T	等温过程
V	等容过程
w	壁面参数

目 录

主要符号表

第一章 基本概念和预备知识	1
§ 1.1 绪论	1
§ 1.2 热力学状态和过程	4
§ 1.3 热力学定律和基本方程	7
1.3.1 内能	8
1.3.2 热力学第一定律,焓,热容	9
1.3.3 热力学第二定律,熵	10
1.3.4 热力学基本方程	11
§ 1.4 完全气体的热力学特性	13
1.4.1 热完全气体状态方程	13
1.4.2 量热完全气体状态方程	14
1.4.3 基本热力学函数的确定	16
§ 1.5 化学热力学简介	20
1.5.1 化学反应式	21
1.5.2 化学热力学基本方程	22
1.5.3 有化学反应的热完全气体混合物的热力学特性	25
1.5.4 化学平衡准则	27
§ 1.6 声速,马赫数	29
1.6.1 声速	30
1.6.2 马赫数,气流速度范围的划分	32
第二章 理想气体运动的基本方程组	36
§ 2.1 引言	36
§ 2.2 连续性方程——质量守恒方程	38
2.2.1 随体观点的积分形式和微分形式	38
2.2.2 当地观点的积分形式和微分形式	39
2.2.3 直角坐标和曲线坐标中连续性方程的表达式	40
§ 2.3 物质导数的变换关系	41

II 目录

2.3.1 微分形式的变换关系	41
2.3.2 有限质量系统积分形式的变换关系	43
§ 2.4 理想气体的动力学方程	44
§ 2.5 动力学方程的几个积分	49
2.5.1 含有涡量及压力函数的动力学方程	50
2.5.2 拉格朗日(Lagrange)积分	51
2.5.3 伯努利(Bernoulli)积分	51
2.5.4 欧拉积分	53
§ 2.6 理想气体的能量方程	55
2.6.1 随体观点的能量方程	55
2.6.2 当地观点的能量方程	57
2.6.3 克罗柯(Crocco)方程	59
§ 2.7 理想气体的基本方程组,初始条件和边界条件	59
2.7.1 微分形式的基本方程组	60
2.7.2 边界条件和初始条件	61
2.7.3 小结	62
第三章 气体的一维定常流动	67
§ 3.1 引言	67
§ 3.2 绝热流和等熵流的基本关系	68
3.2.1 能量方程及其特征常数	68
3.2.2 量纲一的速度 λ	70
3.2.3 沿流线的等熵流关系式	71
3.2.4 比流量密度和流量公式	73
§ 3.3 广义一维定常流的基本方程组	75
3.3.1 几个制约因素在基本方程中的数学表示	75
3.3.2 广义一维定常流的基本方程组	78
3.3.3 流动特性参数的微分关系式	79
§ 3.4 气体沿变截面管道的等熵流动	81
3.4.1 流动参数与截面面积变化的微分关系	82
3.4.2 积分关系式	84
3.4.3 喷管的流速与流量的计算	85
§ 3.5 定常正激波	86
3.5.1 正激波的形成过程简述	87
3.5.2 激波的厚度及激波的数学模型	87

3.5.3	研究正激波前后气流关系的基本方程	88
3.5.4	正激波前后的参数关系	89
§ 3.6	拉瓦尔喷管在各种压比下的工况	95
§ 3.7	等截面绝热摩擦管流	104
3.7.1	摩擦对气流参数的影响	104
3.7.2	摩擦管中气流参数的计算	106
3.7.3	最大管长和摩擦壅塞	108
§ 3.8	等截面加热管流	112
3.8.1	加热对气流参数的影响	113
3.8.2	气流参数的积分关系式	115
3.8.3	热壅塞	118
3.8.4	爆震波和缓烧波简介	119
§ 3.9	简单添质管流	120
3.9.1	添质作用对主流参数的影响	121
3.9.2	气流参数的积分关系式	122
第四章	膨胀波和斜激波	126
§ 4.1	理想气体定常等熵流动的基本方程组	126
§ 4.2	普朗特-迈耶膨胀波	129
§ 4.3	斜激波	135
4.3.1	引言	135
4.3.2	斜激波与正激波的关系	136
4.3.3	斜激波的基本关系式	137
4.3.4	激波极线	143
4.3.5	数值表的用法	145
§ 4.4	激波、膨胀波的反射和相交	147
§ 4.5	计算翼型气动力的激波-膨胀波法和简单波法	154
§ 4.6	超声速圆锥轴对称绕流精确解	156
第五章	理想气体定常势流的线化方法	170
§ 5.1	小扰动线化方程及边界条件,压力系数公式	170
5.1.1	小扰动线化方程	171
5.1.2	线化的物面边界条件	175
5.1.3	线化压力系数	177
§ 5.2	沿波形壁的二维流动	179
5.2.1	亚声速流动	179

IV 目录

5.2.2	超声速流动	181
5.2.3	跨声速流动	183
5.2.4	沿波形壁亚声速流动和超声速流动的讨论	183
§ 5.3	亚声速线化流动的相似法则	183
5.3.1	格泰特(Göthert)法则	184
5.3.2	普朗特-格劳特法则	188
§ 5.4	超声速二维机翼的线化解	193
5.4.1	物理模型和数学模型的建立	193
5.4.2	解法	194
5.4.3	气动系数	197
§ 5.5	小扰动线化方程的基本解	201
5.5.1	不可压缩流体的空间无旋基本流动	201
5.5.2	亚声速线化方程基本解	205
5.5.3	超声速线化方程基本解	208
§ 5.6	细长旋成体绕流	211
5.6.1	小扰动线化方程,边界条件和压力系数	212
5.6.2	亚声速细长体轴对称绕流的源(汇)分布法	213
5.6.3	超声速细长体轴对称绕流的源(汇)分布法	214
§ 5.7	速度图法	217
§ 5.8	卡门-钱学森近似方法	221
第六章	定常超声速流动的特征线法	227
§ 6.1	特征线理论的一般论述	227
6.1.1	数学上特征线的概念	227
6.1.2	定常二维超声速流场中特征线的物理意义	231
§ 6.2	定常二维超声速无旋流动的特征线法	232
6.2.1	控制偏微分方程,特征线和相容关系	232
6.2.2	用特征线法计算流场概述	238
6.2.3	单元处理过程	240
6.2.4	分析已知形状喷管内的流动	244
6.2.5	设计超声速风洞喷管	247
6.2.6	小结	248
§ 6.3	简单波	249
§ 6.4	定常二维等熵有旋超声速流动的特征线法	253
6.4.1	控制偏微分方程、特征线和相容关系	253

6.4.2	数值计算方法	256
6.4.3	单元处理过程	258
6.4.4	尖头物体零攻角超声速绕流流场的计算	261
§ 6.5	定常三维等熵超声速流动的特征线法	262
6.5.1	控制偏微分方程组	263
6.5.2	特征线方程和相容关系	264
6.5.3	定常三维特征线法的简化方法	265
6.5.4	三维特征线法的实际应用	266
附录 A	特征线法数值计算的预备知识	268
第七章	一维不定常流动	270
§ 7.1	控制偏微分方程,特征线方程和相容关系	270
7.1.1	一维不定常等熵流动和均熵流动的控制方程	270
7.1.2	准一维不定常等熵流动控制方程	272
7.1.3	有摩擦、加热和添质效应的广义一维不定常流动控制方程	273
7.1.4	特征线方程和相容关系	276
§ 7.2	一维不定常均熵流动	278
7.2.1	直管中活塞运动引起的扰动	278
7.2.2	特征线和黎曼不变量	280
7.2.3	简单波	282
7.2.4	膨胀波和压缩波的反射和相交	286
§ 7.3	有间断面的流动	292
7.3.1	一维运动激波	293
7.3.2	激波在固壁和开口端的反射	297
7.3.3	激波与激波相互作用,接触面	299
7.3.4	激波管	304
§ 7.4	广义一维不定常流动的特征线法	306
7.4.1	正步进法和逆步进法	307
7.4.2	单元处理过程	308
7.4.3	特征线法在工程上的应用	312
§ 7.5	强烈的点爆炸	313
第八章	跨声速流动	320
§ 8.1	跨声速流动的一般论述	320
8.1.1	临界马赫数和临界压力	320
8.1.2	翼型和尖头旋成体的跨声速绕流图像	322

8.1.3	超声速气体绕钝头体的流动	325
§ 8.2	跨声速流动的相似律	327
8.2.1	三维薄翼跨声速绕流的相似律	327
8.2.2	旋成体轴对称跨声速绕流的相似律	331
§ 8.3	喷管喉部的跨声速流动	333
8.3.1	确定喉道区流场的近似方法	333
8.3.2	喷管喉部型线的确定	336
8.3.3	索尔方法的优缺点和喉部跨声速流场分析的其他方法	337
§ 8.4	跨声速流动数值解法概述	340
§ 8.5	解跨声速薄翼型绕流的混合差分松弛迭代法	342
§ 8.6	解定常跨声速流动问题的依赖时间法	347
8.6.1	喷管准一维流动	348
8.6.2	钝头体超声速绕流	350
§ 8.7	超临界翼型及其设计计算的复特征线法	354
8.7.1	超临界翼型的气动特性	354
8.7.2	超临界翼型的反设计,复特征线法一般介绍	358
附录 B	有限差分法基本概念	361
第九章	高超声速流动引论	369
§ 9.1	高超声速流动的特征	369
§ 9.2	高超声速流中的斜激波和普朗特-迈耶膨胀波	372
9.2.1	斜激波	372
9.2.2	普朗特-迈耶膨胀波	375
§ 9.3	小扰动理论的高超声速相似律	376
§ 9.4	马赫数无关原理	380
§ 9.5	牛顿-布泽曼流动理论	381
§ 9.6	高温气体的性质	384
9.6.1	引言	385
9.6.2	振动弛豫过程	387
9.6.3	化学反应速率过程	388
§ 9.7	非平衡流动、平衡流动和冻结流动	390
9.7.1	非平衡流动	390
9.7.2	平衡流动	391
9.7.3	冻结流动	391
§ 9.8	平衡气体的基本流动	392

9.8.1 正激波	392
9.8.2 普朗特-迈耶膨胀波	394
§ 9.9 非平衡气体的基本流动	396
9.9.1 正激波后的非平衡流动	396
9.9.2 绕凸角的超声速非平衡流动	398
习题	400
数表	430
表 1 一维等熵流气动函数表	430
表 2 正激波前后气流参数表	437
表 3 斜激波前后气流参数表	442
表 4 二维超声速等熵流动函数表	458
参考文献	461
索引	467
作者简介	472

第一章 基本概念和预备知识

§ 1.1 绪 论

气体动力学(Gasdynamics)是流体力学的一个分支,它研究可压缩流体的运动规律及其与固体的相互作用。

一、流体的可压缩系数

流体的可压缩系数定义为体积模量的倒数。若流体微团的压力从 p 增加为 $p + \Delta p$, 则其体积将发生相应的压缩变化,这可用比容的相对变化 $\Delta v/v$ 来表示,流体的体积模量 K 定义为压应力的改变量与比容的相对变化量的比值,即

$$K = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta p}{-\Delta v/v} \right) = -v \frac{dp}{dv} \quad (1.1.1)$$

上式中的负号是考虑了压力增加导致体积减小这一特性而加上的。因而,流体的可压缩系数 τ 应定义为比容的相对变化量与压应力的改变量之比值,即

$$\tau = \frac{1}{K} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1.1.2)$$

由于密度 ρ 与比容 v 互为倒数,上式也可写为

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.1.3)$$

如果压缩过程是等温的,或者是等熵的,则式(1.1.3)可分别表示为

$$\text{等温过程} \quad \tau_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (1.1.4)$$

$$\text{等熵过程} \quad \tau_s = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_s \quad (1.1.5)$$

其中 τ_T 称为等温可压缩系数, τ_s 称为等熵可压缩系数。

与液体相比,气体的可压缩系数要大得多。例如,空气在一个标准大气压(101 325 Pa)下的 $\tau_T = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{N}$, 而水的 $\tau_T = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, 可见空气的可压缩系数要比水的可压缩系数大 4 个量级。

式(1.1.3)可改写为

$$d\rho/\rho = \tau dp \quad (1.1.6)$$

对于实际工程问题,一般认为,只要 $|d\rho/\rho| \geq 5\%$,就必须考虑流动的可压缩性特征。由于气体的 τ 值大,而且高速运动的气体伴随着大的压力梯度,根据式(1.1.6)知,高速气体流动常会超过 $|d\rho/\rho|$ 的低限,因此需要研究高速气流的可压缩性效应,这是气体动力学的任务。后面将要讲到,只有对来流马赫数很小的定常气体流动,方可假定为不可压缩流动来处理。

二、气体动力学的特点

让我们先回顾一下不可压缩流体的动力学,其特点是流速低,动能的变化量远小于介质的内能(分子热运动的能量),因而可假定介质密度不变,认为流体的宏观流动与介质的热力学性质无关。所以不可压缩流动的控制方程组来自两个方面,即

- (1) 运动学方面:质量守恒定律;
- (2) 动力学方面:牛顿定律。

关于介质的属性只用到某些本构关系,如黏性定律等。

气体动力学的特点是气流速度大,其动能的变化量与气体的内能在量级上相当,于是气体的密度与压力一样,也是变量。压力和密度既是描述气体宏观流动的变量,又是描述气体热力学状态的变量,因此这两个变量把气体的动力学和热力学耦合在一起。所以,可压缩流动的控制方程来自四个方面,即

- (1) 运动学方面:质量守恒定律;
- (2) 动力学方面:牛顿定律;
- (3) 热力学方面:能量守恒定律;
- (4) 气体的物理和化学属性方面:如气体状态方程,气体组元间的化学反应速率方程,气体的输运性质(黏性、热传导和组元扩散的定律)等。

由上述四方面组成的控制方程组是非线性的和互相耦合的,给数学求解带来很大困难。

三、气体动力学的发展概况

气体动力学大致经历了以下几个发展阶段。

第一阶段(1870—1935) 气体动力学初步奠基

这一阶段的工程背景是19世纪下半叶的蒸汽机、炮弹和爆炸技术,涉及气流的可压缩性。20世纪初又发明了飞机,受到了第一次世界大战的强烈推动,随着飞行速度的提高,螺旋桨尖也遇到气流的可压缩性问题。另外,学院式的研究也作出了很大贡献,例如,从研究有限振幅的波进而研究激波。在这期间创立了一系列经典理论,其中有:兰金(Rankine, 1870)和许贡纽(Hugoniot, 1887)各自导出了激波关系,其后瑞利(Rayleigh, 1910)和泰勒(Taylor, G. I., 1910)又指

出了这个激波关系的单向性;马赫(Mach, E., 1887)通过观察得出了马赫角关系,其后阿克莱特(Ackeret, J., 1929)把流速和声速之比命名为马赫数;瑞利(1896)又发表了《声学理论》;普朗特和迈耶(Prandtl and Meyer, 1908)则提出了斜激波和膨胀波理论;关于圆锥激波解则先由布泽曼(Busemann, 1928)提出图解法,后又由泰勒和马可尔(Taylor and Maccoll, 1933)提出数值解;拉瓦尔(de Laval, 1882)创造了收缩扩张形喷管,其后由斯多道拉(Stodola, 1903)以及普朗特和迈耶(1908)观测了这种喷管的流动特性;此外,小扰动线化方法、特征线方法和速度图法都在20世纪初相继出现。上述一系列奠基性成果最后由泰勒和马可尔(1935)总结为《可压缩流体力学》一篇,只有41页,发表在杜兰(Durand, W. F.)主编的《空气动力理论》第Ⅲ卷中。值得指出的是,1935年在罗马召开了第五次伏特学术会议,讨论“航空中的高速问题”,普朗特、冯·卡门、布泽曼、泰勒等先驱者均出席了该会,使这次会议成为通向近代气体动力学的里程碑。

第二阶段(1935—1950) 气动热力学大发展

所谓气动热力学(Aerothermodynamics)是指空气动力学和热力学的结合。这个时期的工程背景是喷气飞机、火箭喷气技术、燃气轮机等技术的快速进展,促使气动热力学发展得相当完备。其特点是在完全气体条件下的气动力理论和实验渐趋成熟。20世纪50年代由普林斯顿大学出版的《高速空气动力学和喷气推进》丛书反映了这一阶段本学科的全貌。与此同时,还出版了《气体动力学》的许多优秀教材,本书所附参考文献的[1,2]、[4~7]即是其中的一部分。

第三阶段(1950至今) 气动热化学大发展和计算流体力学大发展

所谓气动热化学(Aerothermochemistry)是指空气动力学与化学热力学、统计物理、化学动力学的结合。这个时期的工程背景是战略武器竞争和空间技术竞争,要解决航天飞行器和火箭技术中的高超声速和高温流动问题。在这里,要考虑介质的性质在高温下发生的物理、化学变化。人们所关心的结果不仅是气动力,而且是高温气流的传热率和温度分布。经过几十年的飞速进展,这个学科已比较成熟了。

与此同时,计算机技术更新换代极快,人们越来越多地依靠数值方法来求解更一般的控制方程组,来解决历史上遗留下来的难题,如跨声速流动,并对无法用实验手段模拟的复杂流动问题作出数值模拟。应该说,几十年来计算流体力学所取得的成就是惊人的。

此外,还应指出,不定常气体动力学日益引人注目,研究不定常流动的时代已经开始了。

现代气体动力学的领域已很宽广,内容也十分丰富,一本书的篇幅根本不可能包罗一切。本教材侧重于选择原理性的基本内容,着重讲无黏性气体运动,但