

● 高等学校教材

气体动力学

● 童秉纲 孔祥言 邓国华

高等教育出版社



TEMS



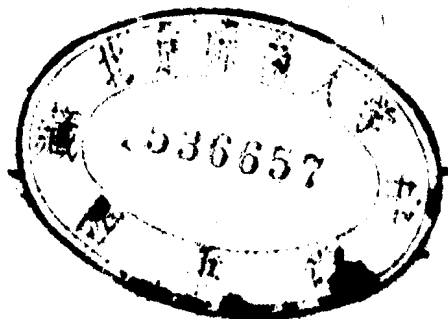
数据加载失败，请稍后重试！

高等学校教材

气体动力学

童秉纲 孔祥言 邓国华

34110415



高等教育出版社

本书共九章，是按照工程力学专业气体动力学课程教学要求编著的。本书注重于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；在讲述典型的处理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。

本书供理工院校力学专业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。

本书是国家教委工程力学专业教材委员会审定的工程力学专业气体动力学课程的教材。

责任编辑 张元直

高等学校教材

气体动力学

童秉纲 孔祥言 邓国华

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张26.5 字数640 000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数0001—960

ISBN 7-04-002895-6/TB·161

定价5.25元

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六十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技大学庄礼贤、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	声速
a_i	反应物的计量系数
b	翼型的弦长
B	$=\sqrt{M_\infty^2 - 1}$ (超声速流)
c_i	混合气体中组元的质量比数
c_p, c_v	定压比热和定容比热
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
D	阻力
e, E	单位质量和总质量的内能
f	重力; 摩阻系数; 分子的自由度数
f, F	单位质量和总质量的海姆霍兹自由能
F	冲量函数
g, G	单位质量和总质量的吉布斯自由焓
h, H	单位质量和总质量的焓
i	$=\sqrt{-1}$
K	体积弹性模量; 化学反应平衡常数
L	升力; 特征长度
m	质量
\dot{m}	质量流量
$m, = \rho V$	比流量
M	马赫数; 摩尔质量; 力矩
n	摩尔数
N	法向力
p	压力
q, Q	单位质量和总质量的热量
\dot{q}, \dot{Q}	单位质量和总质量的加热率
R	气体常数
Re	雷诺数
R_u	气体普适常数
s, S	单位质量和总质量的熵
t	时间; 翼型厚度
T	绝对温度

U	转化流速
v, V	扰动速度和总速度; 比容和总质量容积
w, W	下洗速度和复速度 $=V_x - iV_y$; 单位质量和总质量气体做的功
x, r, θ	柱坐标系
x, y, z	直角坐标系
x_i	混合气体中组元的摩尔比数
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	力的分量
z	$=x+iy$ 复变数
Z	真实气体的压缩性因子
α	攻角
β	$=\sqrt{1-M_\infty^2}$ (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
e	小参数
ξ, η, ζ	对应于 x, y, z 方向的积分变量
θ	气流偏转角
λ	特征线斜率; 无量纲速度 $\lambda = V/a^*$
μ	马赫角; 质量化学势; 粘性系数
ν	运动粘性系数
ρ	密度
σ	面积
τ	体积; 剪切应力; 流体的可压缩系数; 细长体的特征参数
φ, Φ	扰动速度势和总速度势
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, I 族特征线
∞	来流参数
\pm	分别对应于上下翼面; I, I 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
t	切向
p	等压过程
r, θ	径向分量和周向分量
s	等熵过程
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.....3
§ 1.3 热力学定律和基本方程.....6
1.3.1 内能.....6
1.3.2 热力学第一定律, 焓, 比热.....7
1.3.3 热力学第二定律, 熵.....9
1.3.4 热力学基本方程.....9
§ 1.4 完全气体的热力学特性.....11
1.4.1 热完全气体状态方程.....11
1.4.2 量热完全气体状态方程.....12
1.4.3 基本热力学函数的确定.....13
§ 1.5 化学热力学简介.....17
1.5.1 化学反应式.....17
1.5.2 化学热力学基本方程.....18
1.5.3 有化学反应的热完全气体混合物的热力学特性.....21
1.5.4 化学平衡准则.....23
§ 1.6 声速, 马赫数.....25
1.6.1 声速.....25
1.6.2 马赫数, 气流速度范围的划分.....27
第二章 理想气体运动的基本方程组30
§ 2.1 引言.....30
§ 2.2 连续性方程——质量守恒方程.....31
2.2.1 随体观点的积分形式和微分形式.....32
2.2.2 当地观点的积分形式和微分形式.....32
2.2.3 直角坐标和曲线坐标中连续性方程的表达式.....34
§ 2.3 物质导数的变换关系.....34
2.3.1 微分形式的变换关系.....35
2.3.2 有限质量系统积分形式的变换关系.....36

§ 2.4 理想气体的动力学方程.....37
§ 2.5 动力学方程的几个积分.....42
2.5.1 含有涡量及压力函数的动力学方程.....42
2.5.2 拉格朗日积分.....43
2.5.3 伯努利积分.....44
2.5.4 欧拉积分.....45
§ 2.6 理想气体的能量方程.....47
2.6.1 随体观点的能量方程.....47
2.6.2 当地观点的能量方程.....49
2.6.3 克罗柯方程.....50
§ 2.7 理想气体的基本方程组, 初始条件和边界条件.....51
2.7.1 微分形式的基本方程组.....51
2.7.2 边界条件和初始条件.....53
2.7.3 小结.....53
第三章 气体的一维定常流动57
§ 3.1 引言.....57
§ 3.2 绝热流和等熵流的基本关系.....57
3.2.1 能量方程及其特征常数.....58
3.2.2 无量纲速度—— λ 数.....60
3.2.3 沿流线的等熵流关系式.....60
3.2.4 比流量和流量公式.....62
§ 3.3 广义一维定常流的基本方程组.....64
3.3.1 几个制约因素在基本方程中的数学表示.....64
3.3.2 广义一维定常流的基本方程组.....66
3.3.3 流动特性参数的微分关系式.....68
§ 3.4 气体沿变截面管道的等熵流动.....70
3.4.1 流动参数与截面积变化的微分关系.....70
3.4.2 积分关系式.....72
3.4.3 喷管的流速与流量的计算.....73

§ 3.5 定常正激波	74	5.1.1 小扰动线化方程	152
3.5.1 正激波的形成过程简述	74	5.1.2 线化的物面边界条件	155
3.5.2 激波的厚度及激波的数学模型	75	5.1.3 线化压力系数	157
3.5.3 研究正激波前后气流关系的基本方程	76	§ 5.2 沿波形壁的二维流动	159
3.5.4 正激波前后的参数关系	76	5.2.1 亚声速流动	160
§ 3.6 拉伐尔喷管在各种压比下的工况	82	5.2.2 超声速流动	161
§ 3.7 等截面绝热摩擦管流	90	5.2.3 跨声速流动	163
3.7.1 摩擦对气流参数的影响	90	5.2.4 沿波形壁亚声速流动和超声速流动的讨论	163
3.7.2 摩擦管中气流参数的计算	92	§ 5.3 亚声速线化流动的相似法则	164
3.7.3 最大管长和摩擦壅塞	94	5.3.1 戈太特(Göthert)法则	164
§ 3.8 等截面加热管流	98	5.3.2 普朗特-葛劳涅特法则	167
3.8.1 加热对气流参数的影响	98	§ 5.4 超声速二维机翼的线化解	172
3.8.2 气流参数的积分关系式	100	5.4.1 物理模型和数学模型的建立	172
3.8.3 热壅塞	104	5.4.2 解法	173
3.8.4 爆震波和缓烧波简介	105	5.4.3 气动力系数	176
§ 3.9 简单添质管流	106	§ 5.5 小扰动线化方程的基本解	180
3.9.1 添质作用对主流参数的影响	107	5.5.1 不可压缩流体的空间无旋基本流动	180
3.9.2 气流参数的积分关系式	108	5.5.2 亚声速线化方程基本解	184
第四章 膨胀波和斜激波	112	5.5.3 超声速线化方程基本解	186
§ 4.1 理想气体定常等熵流动的基本方程组	112	§ 5.6 细长旋成体绕流	190
§ 4.2 普朗特-迈耶膨胀波	115	5.6.1 小扰动线化方程、边界条件和压力系数	190
§ 4.3 斜激波	120	5.6.2 亚声速细长体轴对称绕流的源(汇)分布法	191
4.3.1 引言	120	5.6.3 超声速细长体轴对称绕流的源(汇)分布法	192
4.3.2 斜激波与正激波的关系	121	§ 5.7 速度图法	195
4.3.3 斜激波的基本关系式	122	§ 5.8 卡门-钱学森近似方法	199
4.3.4 激波极线	127	第六章 定常超声速流动的特征线法	204
4.3.5 数值表的用法	129	§ 6.1 特征线理论的一般论述	204
§ 4.4 激波、膨胀波的反射和相交	131	6.1.1 数学上特征线的概念	204
§ 4.5 计算翼型气动力的激波-膨胀波法和简单波法	138	6.1.2 定常二维超声速流场中特征线的物理意义	207
§ 4.6 超声速圆锥轴对称绕流精确解	140	§ 6.2 定常二维超声速无旋流动的特征线法	208
第五章 理想气体定常势流的线化方法	151	6.2.1 控制偏微分方程、特征线和相容关系	208
§ 5.1 小扰动线化方程及边界条件, 压力系数公式	151	6.2.2 用特征线法计算流场概述	213

6.2.3 单元处理过程	214	§ 7.4 广义一维不定常流动的特征 线法	274
6.2.4 分析已知形状喷管内的流动	219	7.4.1 正步进法和逆步进法	275
6.2.5 设计超声速风洞喷管	221	7.4.2 单元处理过程	276
6.2.6 小结	222	7.4.3 特征线法在工程上的应用	279
§ 6.3 简单波	223	§ 7.5 强烈的点爆炸	280
§ 6.4 定常二维等熵有旋超声速 流动的特征线法	226	第八章 跨声速流动	286
6.4.1 控制偏微分方程、特征线和相容 关系	226	§ 8.1 跨声速流动的一般论述	286
6.4.2 数值计算方法	229	8.1.1 临界马赫数和临界压力	286
6.4.3 单元处理过程	231	8.1.2 翼型和尖头旋成体的跨声速绕流 图象	287
6.4.4 尖头物体零攻角超声速绕流流场 的计算	233	8.1.3 超声速气体绕钝头体的流动	290
§ 6.5 定常三维等熵超声速流 动的特征线法	234	§ 8.2 跨声速流动的相似律	291
6.5.1 控制偏微分方程组	235	8.2.1 三维薄翼跨声速绕流的相似律	292
6.5.2 特征线方程和相容关系	235	8.2.2 旋成体轴对称跨声速绕流的相 似律	295
6.5.3 定常三维特征线法的简化方法	236	§ 8.3 喷管喉部的跨声速流动	297
6.5.4 三维特征线法的实际应用	237	8.3.1 确定喉道区流场的近似方法	297
附录 A 特征线法数值计算的预备 知识	239	8.3.2 喷管喉部型线的确定	300
第七章 一维不定常流动	241	8.3.3 索尔方法的优缺点和喉部跨声速 流场分析的其它方法	301
§ 7.1 控制偏微分方程, 特征线方程 和相容关系	241	§ 8.4 跨声速流动数值解法概述	303
7.1.1 一维不定常等熵流动和均熵 流动的控制方程	241	§ 8.5 解跨声速薄翼型绕流的混合 差分松弛迭代法	305
7.1.2 准一维不定常等熵流动控制 方程	242	§ 8.6 解定常跨声速流动问题的依 赖时间法	309
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	243	8.6.1 喷管准一维流动	310
7.1.4 特征线方程和相容关系	247	8.6.2 钝头体超声速绕流	312
§ 7.2 一维不定常均熵流动	249	§ 8.7 超临界翼型及其设计计算的 复特征线法	315
7.2.1 直管中活塞运动引起的扰动	249	8.7.1 超临界翼型的气动特性	316
7.2.2 特征线和黎曼不变量	251	8.7.2 超临界翼型的反设计·复特征线 法一般介绍	318
7.2.3 简单波	252	附录 B 有限差分法基本概念	321
7.2.4 膨胀波和压缩波的反射和相交	256	第九章 高超声速流动引论	329
§ 7.3 有间断面的流动	261	§ 9.1 高超声速流动的特征	329
7.3.1 一维运动激波	261	§ 9.2 高超声速流中的斜激波和 普朗特-迈耶膨胀波	331
7.3.2 激波在固壁和开口端的反射	266	9.2.1 斜激波	332
7.3.3 激波与激波相互作用·接触面	267	9.2.2 普朗特-迈耶膨胀波	334
7.3.4 激波管	272		

§ 9.3 小扰动理论的高超声速相似律.....	335	9.8.2 普朗特-迈耶膨胀波 (P-M 膨胀波)	350
§ 9.4 马赫数无关原理.....	338	§ 9.9 非平衡气体的基本流动	352
§ 9.5 牛顿-布兹曼流动理论	339	9.9.1 正激波后的非平衡流动.....	352
§ 9.6 高温气体的性质	342	9.9.2 绕凸角的超声速非平衡流动.....	354
9.6.1 引言.....	342	习题	354
9.6.2 振动弛豫过程.....	344	数表	343
9.6.3 化学反应速率过程.....	345	表 1 一维等熵流气动函数表	343
§ 9.7 非平衡流动、平衡流动和冻结流动	347	表 2 正激波前后气流参数表	348
9.7.1 非平衡流动.....	347	表 3 斜激波前后气流参数表	392
9.7.2 平衡流动.....	348	表 4 二维超声速等熵流动函数表	402
9.7.3 冻结流动.....	348	参考书目	404
§ 9.8 平衡气体的基本流动	349	参考文献	405
9.8.1 正激波.....	349	索引	403

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弹性模量的倒数。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, 流体的体积弹性模量 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

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

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

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。例如空气在一个大气压下的 $\tau_T = 10^{-5}$ 米²/牛顿, 而水的 $\tau_T = 5 \times 10^{-10}$ 米²/牛顿, 可见空气的可压缩系数要比水的可压缩系数大四个量级。

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，如粘性定律等。

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（粘性、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十九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。本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）和雨贡纽（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（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兹曼（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；拉伐尔（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本世纪初相继出现。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、布兹曼、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。五十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，本书所附参考书目的〔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，着重讲无粘性气体运动，但适当反映气动热化学的概念和现代数值计算的潮流。

四、气体动力学所要解决的问题

气体动力学的一类问题是研究高速气体对物体（如飞行器）的绕流，称为外部流动问题。其中正问题的提法为：给定物体的外形和流场的边界条件和初始条件，要求解绕流流场的流动参数，特别是求出作用在物面上的气动力特性。有时也要解反问题：给定流场的一部分条件和需要达到的气动力指标（如高升阻比），要求解出最佳物形。

气体动力学的另一类问题是研究气流在通道中的流动规律，例如研究喷管、涡轮机和激波管内的流动，统称为内部流动问题。这里同样有正问题和反问题之分。

当然还有上述两类以外的问题有待气体动力学去解决，例如爆炸波系的相互作用，又如重力作用下非均温流场的大尺度对流等。本书选材的背景着重于研究外流和内流。

在本章中我们先来简要复习热力学的基础知识，列举那些与本书有关的概念和结论；然后，再叙述声速、马赫数，介绍亚声速流和超声速流的特征。

§ 1.2 热力学状态和过程

本节介绍经典热力学的一些定义和概念，并说明如何把它们推广应用到运动气体的连续流场。

一、热力学系统

如同在力学系统中取分离体那样，在热力学中也要取一部分物质或区域作为研究对象，称为热力学系统，简称系统。与所研究的热力学系统相邻接的物质或区域称为环境。系统与环境之间一般存在着相互作用，例如传热、传质或作功。

凡与环境之间无质量交换的系统,称为**封闭系统**。它在气体动力学中对应于**随体观点**(拉格朗日表示法)。凡与环境之间有质量交换的系统,称为**开口系统**。它对应于**当地观点**(欧拉表示法)。凡与环境之间无热量交换的封闭系统,称为**绝热系统**。凡与环境之间没有任何相互作用的系统,则称为**孤立系统**。

为了论述方便起见,把完全均质的物质系统定义为**均匀系统**,或**单相系统**;否则称为**非均匀系统**,或**多相系统**。又把只含一种化学组分的物质系统定义为**单元系统**;否则称为**多元系统**。

二、热力学状态

首先来定义**热力学平衡态**(简称**平衡态**),它是指某个孤立系统在经过足够长的时间后,其热力学特性达到不再变化的状态。

一个达到平衡态的系统的**热力学特性**(简称**热力特性**)可用若干**状态变量**来描述,这些有:

p = 压力 (牛顿/米²), T = 绝对温度 (开),

V = 容积 (米³), E = 内能 (焦耳),

H = 焓 (焦耳), S = 熵 (焦耳/开)。

其中压力和温度这一类变量,与所取系统的大小及其包含的质量大小均无关,属于**强度量**(或称**含量**);而其余各量,如内能、容积等,是与所取系统的大小及其所含质量大小直接相关的,具有可加性,属于**广延量**。把这些广延量除以系统所含质量就得到具有单位质量的系统的状态变量,这便在形式上把广延量化为强度量,它们是:

v = 比容 (米³/千克), $\rho = \frac{1}{v}$ = 密度 (千克/米³),

e = 比内能 (焦耳/千克), h = 比焓 (焦耳/千克),

s = 比熵 (焦耳/千克·开)。

上面列出的若干状态变量并不是彼此独立的,而是存在着一定的关系。由实验测定而建立的气体状态方程是其中一类关系。另一类是基于热力学定律得出的状态方程。

要对系统的热力学状态给予完整的描述,需要两类**气体状态方程**:**热状态方程**和**量热状态方程**。

均匀系统的热状态方程根据实验观察可表示为下列函数关系

$$p = p(v, T) \quad (1.2.1a)$$

或写成

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1.2.1b)$$

式中诸量都是可测量的。

仅依靠式(1.2.1),还不足以求出该平衡系统的全部热力特性,因而还需要确定**量热状态方程**。对于**均匀系统**,其函数形式为

$$e = e(v, T) = e(p, T) \quad (1.2.2)$$

或

$$h = h(v, T) = h(p, T) \quad (1.2.3)$$

式中比内能 e 和比焓 h 是不可测量的,因此这样的关系式要由热力学定律并且利用热状态方

程而导出。

三、局部状态原理

在气体动力学中，我们要把经典热力学的概念和定律推广应用到连续流场，需要引入连续系统的概念。它是这样的非均匀系统，其内部各点的强度变量 (p, T) 是连续变化的，首先，我们对连续系统的状态变量要给定义。为此，我们在连续系统中任取一个具有假想的绝热壁的微元体 ΔV_i 。假定该微元体处于局部热平衡态，于是描述连续系统热力特性的状态变量可定义为

$$T_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \bar{T}_i, \quad p_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \bar{p}_i \quad (1.2.4)$$

其中带上标“—”的量表示微元体中状态变量的平均值。这样的定义可推广到那些由广延量转化成的强度量。

所以，连续系统的热力特性可用欧拉法表示为

$$\left. \begin{aligned} T &= T(x, y, z, t), \quad p = p(x, y, z, t) \\ v &= v(x, y, z, t), \quad e = e(x, y, z, t) \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (1.2.5)$$

现在有一个问题有待解决，即连续系统的状态除了用上列函数(式1.2.5)表示以外，是否还需要包括各种物理量的梯度在内？因为伴随着各种梯度的是各种交换率(质量交换、能量交换等)，显然这对确定系统的状态也是一个重要的方面。但是根据实验观察知，当各种梯度不大时，连续系统的诸状态变量之间的局部和瞬时关系，就如同均匀系统的状态方程一样。这就是局部状态原理。根据这个原理，适用于封闭均匀系统的一切经典热力学结论和概念就可以推广用到连续系统。

四、热力学过程

如描述系统热力特性的状态变量有一个或几个发生变化时，这一变化过程称为热力学过程。

可逆过程是一种理想化的热力学过程，它定义为：在封闭系统中，过程的每一步都可在相反的方向进行，而不对系统和环境引起任何其它变化。否则便是不可逆过程。

自然界的任何自发过程都是不可逆过程。例如，当系统内气体有速度梯度时，由于粘性作用而引起动量输运过程，使速度场趋于均匀。当存在温度梯度时，则因热传导而引起热流，使温度场趋于均匀，这是能量输运过程。当混合气体的组元浓度分布出现梯度时，则产生质量扩散流，使浓度分布趋于均匀，这是物质输运过程。我们发现，实际过程中一般存在各种交换率，称之为各种“流”，只要有“流”存在，便是不可逆过程。

什么样的过程可近似地看作可逆过程呢？它必须是准静态过程，这是指：在过程进行之中，系统受到环境的作用是连续的而且是无限小的，因而这种系统可认为始终处在平衡态，认为过程速率无限小，不发生任何“流”，没有任何损耗。

五、功和热量

与热力学过程相关的物理量有：环境对系统所作的功 W 和传递的热量 Q 。这些量取决于热力学过程进行的具体情况，例如大家知道的，功与路程有关。一般来说，这些量不能仅根据过程的初态和终态来确定，因而是与状态变量在性质上不同的另一类物理量，称为过程量。