

可压缩流体动力学

〔美〕P. A. 汤普森 著

科学出版社

可压缩流体动力学

[美] P. A. 汤普森 著

田安久 张瑜 译
朱丰泉 高宏智
吴文校

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是为美国大学高年级学生和研究生编写的教材。全书共分十一章。前三章是导言性质的,第四章是物理声学,第五章至第九章是可压缩流体动力学的基本理论,最后两章讨论了自相似运动和可压缩流动中的模拟问题。本书特点是物理概念清楚,处理问题细致,结合物理现象和实际问题紧密。各章后面一般都附有大量习题,有助于读者加深理解书中内容。

本书可供大学高年级学生和研究生、教师阅读,也可供有关科研人员和工程技术人员参考。

2091/3222

Philip A. Thompson

COMPRESSIBLE-FLUID DYNAMICS

McGraw-Hill 1972

可压缩流体动力学

[美] P. A. 汤普森 著

田安久 张瑜 译

朱丰泉 高宏智

吴文校

责任编辑 吕虹 谈德颜

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年2月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1986年2月第一次印刷 印张: 19 1/8

印数: 0001—2,500 字数: 499,000

统一书号: 13031·3068

本社书号: 3877·13—2

定 价: 5.40 元

译 者 的 话

这是一本论述可压缩流体运动的著作。本书突出的优点是：论述气体运动的基本过程都是从实际现象出发，然后运用气体动力学基本定律和热力学定律，经过合理的假设，把这些定律进行简化整理，最后得出实用的计算公式。从头到尾，步步交代清楚，做到这一点是不容易的。有不少很好的气体动力学著作，只做到上述全过程的一部分，虽然各有其精辟独到之处，但和本书相比，上述优点是它们所不及的，尤其在论述声波、激波和非定常流动的几章中，更容易看出来。可以说这是一本着重理论联系实际的书。它引导初学气体动力学的人，明确可压缩流动基本过程的物理本质，打好坚实的理论基础，然后再深入到其他各个专门的领域。

边界层流动问题是现代气体动力学的一个重要环节，但是本书论述得很简略，只是把它分列在有关章节之中，从相似理论的观点来讨论它。因此关于边界层的一些基本概念都没有提到，这是本书不足之处。

另外，最后两章，自相似理论和模拟问题，内容较多，问题的处理也显得匆忙，使初学者不容易掌握问题的实质。但从另一方面看，这样论述似乎又体现了作者的一个企图，即使得已经具有一定理论基础的人，通过分析几个典型事例，熟悉和掌握在理论上研究和解决新问题的一些有效方法。

本书可作为大学高年级学生和研究生气体动力学教科书，也可作为有关工程技术人员和科研人员的参考书。

本书的序言和第三、八、九章由田安久译，符号表和第五、七章以及附录 A, O, D, E, F 由张瑜译，第一、二、六章和附录 B 由高宏智译，第四、十、十一章由朱丰泉译，全书由吴文同志校订。

书中人名仍用原文,但用人名命名的专用名词或术语,如“马赫数”、“多普勒效应”、“拉普拉斯方程”等,则译成中文。相应的中译名在书中第一次出现时,用括号在后面注明原文。为方便读者,书后附有人名对照表。

译者

序 言

本书介绍可压缩流体运动即气体动力学的基本原理,打算作为工程、物理和应用数学等方面的大学高年级学生和研究生教科书。对于各种不同领域的应用科学研究人员来说,本书作为一种资料来源,也有参考价值。

前三章是导言性质的,本书包括这几章是为了使关于流体力学的论述成为一个完整的体系。第一章和第二章简明地介绍有关的连续介质力学和热力学;第三章叙述应用于可压缩流体流动的量纲理论。初读这几章材料的学生大概会感到吃力,因而,需要预先学习流体力学和热力学的初步课程。在这些领域已经具有足够知识的学生可以跳过这三章内容。

本书内容多于通常一学期或一学季的课程所包含的正常的分量。至于适合于某一特定课程的教材,可由教师自行选择。

在气体动力学方面,已经有几本优秀的著作问世,特别值得提出的是 Shapiro 的《可压缩流体的流动》和 Liepmann 与 Roshko 合著的《气体动力学基础》。作为一个学生和尔后作为一个教师,我有幸读到这些著作,受益匪浅,谨向他们表示感谢。然而,如果仅仅是对这些已有的著作加以修补翻新,那是浪费时间和徒劳的。我所提供的这本书,并不是对某部有名望的著作重新领悟的结果,而是一部具有它自身特点和不足的书籍。读了这部书,就可以对它作出最恰当的评价。

在选材时,我力求侧重基本课题,如声学、激波和可压缩流动本身的性质等。简言之,材料的选择偏重于基本原理而不是应用技巧。在挑选一些供探讨的专门问题时,我优先选择了那些看来为一般经验所容易理解的问题;按照这种思路,我没有着力论述诸如远离热力学平衡态的高温气体或流体这样一些多少有些深奥的课题。

.....

P. A. 汤普森

符 号 表¹⁾

a	亥姆霍兹(Helmholtz)函数, $a \equiv e - Ts$
A	横截面积; 振幅系数; 表面积
b	边界速度或激波波阵面速度
B	泰特(Tait)方程中的常数
c	声速, $c^2 \equiv \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s$, 或相速度
c_p	定压比热, $c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$
c_v	定容比热, $c_v \equiv \left(\frac{\partial e}{\partial T} \right)_v$
C^+, C^-	xt 平面内的特征线标记
D_{ik}	变形率张量的分量
e	自然对数的底; 比内能
$\mathbf{e}$	单位向量
E	单位容积的声能, $E \equiv \frac{p^2}{2\rho_0 c_0^2} + \frac{\rho_0 u^2}{2}$; 电压(电势)
f	波动函数; 一般的函数; 自由度; 基本量纲的数目
F	波动函数; 力; 热力学函数, $F \equiv \int \frac{dP}{\rho c}$
g	波动函数; 重力加速度; 吉布斯(Gibbs)函数, $g \equiv h - Ts$
G	单位体积力向量
h	比焓, $h \equiv e + Pv$; 普朗克(Planck)常数; 浅水理论中的液体深度
H	大气的标高, $H \equiv \frac{RT_0}{g_0}$; 伯努利(Bernoulli)常数, $H \equiv h + \frac{u^2}{2} + \Psi$

1) 一些不重要的仅临时使用的符号, 未列入此表。

i	虚数单位, $i \equiv \sqrt{-1}$
$\hat{i}$	笛卡儿(Cartesian)坐标的单位向量
I	积分
I_s	比冲量
$\mathcal{I}_m$	表达式的虚数部分
$\hat{j}$	笛卡儿坐标的单位向量
J	质量通量, $J \equiv \rho u$; 分子通量
J^+, J^-	黎曼(Riemann)不变量
k	波数, $k \equiv \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c}$; 玻耳兹曼(Boltzmann)常数
$\mathbf{k}$	波数向量, $\mathbf{k} \equiv k\mathbf{e}$
K	常数; 体积弹性模量; 弹簧常数
l	沿声音射线的距离; 间隔距离
L	长度; 电感
m	质点质量
m^+, m^-	马赫(Mach)波(特征线)的标记; 沿马赫波的距离
$\dot{m}$	质量流率
M	马赫数, $M \equiv \frac{u}{c}$; 总质量
$\hat{M}$	分子量
n	垂直于流线的距离; 折射率, $n \equiv \frac{c_0}{c}$; 分子的数密度; 有量纲的变量的数目
$\mathbf{n}$	单位法向向量
N	大气中的振荡频率(考虑到稳定性, 有 $N^2 > 0$)
$\tilde{N}$	阿伏伽德罗(Avogadro)数
$\mathcal{N}$	克分子数
O	数量级缩写
p	声(扰动)压, $p \equiv P - P_0$; 无量纲变量的数目
P	压强(绝对)
Pr	普朗特(Prandtl)数, $Pr \equiv \mu c_p / k$

q	交通流率, $q \equiv \rho u$
$\mathbf{q}$	热通量向量
r	球坐标或圆柱坐标; 具有独立量纲的变量数
R	半径; 比气体常数, $R \equiv \frac{\tilde{R}}{M}$; 电阻
$\tilde{R}$	通用气体常数, $\tilde{R} = \tilde{N}k$
$\mathcal{R}$	声阻抗, $\mathcal{R} \equiv \rho c$
Re	雷诺 (Reynolds) 数, $Re \equiv \frac{Lu}{\nu}$
$\Re$	表达式的实数部分
s	比熵; 沿流线的距离
S	凝速, $S \equiv \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$; 表面
t	时间
T	绝对温度
$\mathbf{T}$	表面牵引力向量
u	速度的量值; x 方向的速度分量
$\mathbf{u}$	向量速度
U	速度; 容积速度 $U \equiv uA$
v	平行于激波波阵面的相对速度分量; y 方向的速度分量
$\mathbf{v}$	分子速度
ν	比容, $\nu \equiv \frac{1}{\rho}$
V	体积; 分子的特有速度
w	垂直于激波波阵面的相对速度分量
w	风速
$\mathbf{x}$	向量空间坐标
X	一般变量
x, y, z	笛卡儿坐标系的空间坐标
r	圆柱坐标; 海拔高度

α	衰减系数; 常数; 振幅函数; 热扩散率, $\alpha \equiv \kappa / \rho c_p$
β	体积热胀系数, $\beta \equiv \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$; 激波波阵面角; 线性化方程中的系数, $\beta = \sqrt{M_\infty^2 - 1} $
γ	比热比, $\gamma \equiv \frac{c_p}{c_v}$; 泰特方程中的指数
Γ	无量纲热力学变量, $\Gamma \equiv \frac{\rho^3 \sigma^4}{2} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial P^2} \right)$
Γ_0	环量, $\Gamma_0 \equiv \oint \mathbf{u} \cdot d\mathbf{l}$
δ	小的变量; 扩散率, $\delta \equiv \frac{4\mu/3 + \mu_v}{\rho} + \frac{\gamma - 1}{\text{Pr}} \frac{\mu}{\rho}$; 比热比, $\delta \equiv \frac{c_{vp}}{c_{vo}}$; 边界层厚度
δ_{ik}	克罗尼柯(Kronecker)符号
Δ	改变量; 分贝级; 激波波阵面厚度
ε	小量; 激波波阵面角与马赫角之差, $\varepsilon \equiv \beta - \mu$; 每个分子的能量
ε_{ijk}	列维-齐维他(Levi-Civita)三重指标张量
η	相似变量; 质量百分率
θ	流动角; 温度
κ	导热率
λ	波长
Λ	分子平均自由程
μ	粘度(通常的剪切粘度); 马赫角, $\mu \equiv \sin^{-1} \frac{1}{M}$
μ_v	体积粘度
ν	运动粘度, $\nu \equiv \frac{\mu}{\rho}$; 频率
ξ	流体质点的位移; 质量迁移
$\mathcal{E}$	熵通量
π	$\pi = 3.14159 \dots$
Π	无量纲压强突跃, $\Pi \equiv \frac{[P]}{\rho_1 c_1^2}$; 一般的无量纲量

Π_{ik}	分子动量通量
ρ	密度
σ	分子直径
σ_{ik}	应力张量的分量
Σ	总和
Σ	空间坐标的函数
Σ_{ik}	粘性应力张量的分量
τ	松弛时间; 无量纲时间
γ	耗散函数, $\gamma \equiv \Sigma_{ik} D_{ik}$
ϕ	速度势
φ	分子势
Φ_s	声能通量(声强)
Φ_m	声动量通量
χ	克分子分数
ψ	极坐标; 流函数
Ψ	力势
ω	角频率; $\omega = 2\pi\nu$; 普朗特-迈耶 (Prandtl-Meyer) 函数
Ω	旋度向量, $\Omega \equiv \nabla \times \mathbf{u}$
Ω_{ik}	旋转张量的分量

目 录

译者的话	1
序言	iii
符号表	ix
第一章 流体运动的描述	1
1.1 引言	1
1.2 运动的动力学定律	3
1.3 运动学	4
1.4 本构方程	15
1.5 运动诸方程	28
1.6 适用于控制体积的平衡方程	36
第二章 流体运动的热力学基础	47
2.1 引言	47
2.2 局部热力学状态	47
2.3 熵	51
2.4 熵与旋度	63
2.5 理想气体	69
2.6 液体和稠密气体	90
2.7 输运属性	97
第三章 量纲、相似和量级	105
3.1 引言	105
3.2 几何关系	106
3.3 单位和量纲	108
3.4 无量纲形式	113
3.5 量级估计	123
3.6 自相似运动	135
3.7 基于坐标变换的相似性	139

第四章 物理声学	143
4.1 引言	143
4.2 波动方程	146
4.3 声速	149
4.4 一维的波运动	155
4.5 球对称的波运动	160
4.6 声学的近似处理	162
4.7 能量和动量的传递	164
4.8 弱间断	169
4.9 在边界上的反射和透射	173
4.10 声在管道中的传播	182
4.11 几何声学	185
4.12 一些基本的辐射场	198
4.13 声音的衰减	205
第五章 定常可压缩流的性质	219
5.1 马赫数	219
5.2 无粘性流能量方程	226
5.3 位势流	232
5.4 位势流的线化描述	234
5.5 完全气体的等熵流动	242
第六章 一维定常流动	251
6.1 引言	251
6.2 等熵流动	252
6.3 完全气体的等熵管流	255
6.4 等截面摩擦管流	266
第七章 激波及与其相关的不连续性问题	277
7.1 引言	277
7.2 激波条件	279
7.3 激波的性质	287
7.4 正激波	294
7.5 斜激波	297
7.6 弱激波和强激波的近似算法	305
7.7 接触面	309

7.8	爆震波	316
7.9	凝结突跃	326
7.10	连续激波结构	328
第八章	一维非定常流	340
8.1	引言	340
8.2	均熵流的特征方程	340
8.3	边界条件和积分	346
8.4	简单波	348
8.5	激波的形成	350
8.6	活塞引起的完全气体的运动	357
8.7	具有弱激波的流动	367
8.8	波的相互作用	374
8.9	基本装置	385
8.10	等熵流的特征方程	395
8.11	有限振幅波中的粘性效应	398
第九章	二维定常超声速流	404
9.1	引言	404
9.2	普朗特-迈耶函数	405
9.3	特征线法	410
9.4	两个自变量的特征线法的一般论述	423
9.5	具有激波的流动	432
第十章	自相似运动	439
10.1	引言	439
10.2	普朗特-迈耶膨胀	439
10.3	锥形流动	442
10.4	强烈的爆炸	450
10.5	激波后面的层流边界层	456
10.6	终结	468
第十一章	可压缩流动中的模拟问题	471
11.1	引言	471
11.2	浅水流动	471
11.3	交通流动	486

11.4	电声模拟	492
11.5	松弛流动的模拟量	502
11.6	终结	511
参考文献		512
附录 A	弱激波突跃	520
附录 B	基本的热力学等式和向量等式	526
附录 C	常量及其转换	532
附录 D	可压缩流动数据表	535
表 D.1	完全气体的等熵流动 ($\gamma=1.40$)	535
表 D.2	完全气体中的正激波 ($\gamma=1.40$)	548
表 D.3	完全气体中的斜激波 ($\gamma=1.40$)	560
表 D.4	标准大气	581
附录 E	圆柱坐标和球坐标中的方程	583
附录 F	流体的性质	588
表 F.1	原子量以碳 ¹² =12 为基准	588
表 F.2	在 1 大气压和 293.15 K=20°C=68°F 条件下气体的 热力性质	588
表 F.3	在 1 大气压和 293.15 K=20°C=68°F 条件下液体的性 质	591
表 F.4	在 1 大气压和 293.15 K=20°C=68°F 下基本导数 Γ 的 数值	592
人名对照表		593

第一章 流体运动的描述

1.1 引言

流体力学是研究各种气体和液体运动的科学。而气体动力学(即可压缩流体的流动)则研究流体密度变化起重要作用的那些运动。

虽然在每一种实际流动中,总有一些密度变化,但往往可以忽略这种变化,按照不可压缩的理想模式来处理流体的流动。这种近似方法不但适用于液体,也可以适用于气体,例如围绕飞机的低速流动或通过真空除尘器的流动。

另一方面,与液体和气体中声波运动相联系的密度变化虽然很小,却不能忽略。关于必须考虑密度变化的精确条件的讨论,需要用到一些分析手段,将放到第三章进行。这里我们先根据第三章的讨论结果,直接列出流体压缩性起决定作用的主要运动类型:

1. 波在流体内的传播。
2. 流速与声速同数量级的定常流动。
3. 作用在热膨胀流体上的体积力(如重力)所引起的对流。
4. 有体积力存在时,气体的大尺度对流。

上列各条并非包括无遗,而且有些运动也许不只属于一种类型。本书主要致力于讨论前两类运动,它们都与流体的声速有关。

在这一章中,以相当普遍的形式推导了运动的主要方程。虽然对许多应用来说,这种普遍程度是不太需要的(如在很多问题中粘性力可以略去),但它将使我们能够合理地得到各种简化近似。在本章所给的推导中,省略了某些详细步骤。欲知更完整的论述,可参阅 Batchelor 著作[见参考文献 1967,第一章至第三章]或

Aris 著作[见参考文献 1962, 第一章至第六章]。

从流体是一种连续介质(即视流体为一种无论怎样细分都不呈现具体结构的物质)的概念出发,推导了运动诸方程。正是连续介质模型才有可能描述空间点上的流体属性(如密度、温度和速度),且在数学上把它们视为空间和时间的连续函数。这种模型得以应用到流体运动上,主要应归功于 Leonhard Euler(1755)。从连续介质观点看来,流体力学和固体力学的处理方法有很多共同点(事实上,本章中许多方程同样地适用于各种流体和固体),它们合称为连续介质力学。

还有另一条研究的途径,它从物质的微粒观点入手,利用对大量分子求平均值的办法最后得出连续介质方程。这种方法虽然在原理上也许更普遍,但由于玻耳兹曼(Boltzmann)方程用到稀薄气体上的实际困难而受到限制,所以此处不加论述。

可以预料,当所关心的流体区域的大小和分子结构的特征长度数量级相同时,连续介质模型就要失效了。适用于各种气体的特征长度是分子平均自由程 Λ (对于标准条件下的空气,其数量级是 10^{-7} 米)。至于液体,相应的特征分子长度无法明确加以定义,但我们可以取分子间距的若干倍作为特征长度(对水来说,分子间距 L 是 10^{-10} 米的数量级)。这些特征长度是如此之小,以致仅在某些极端情况下才违背连续介质模型。两个这样的实例是:直径 d 很小的尘埃或烟尘微粒在大气中的运动($d \sim \Lambda$);以及波长为 λ 的高频声音¹⁾在空气中($\lambda \sim \Lambda$)乃至在液体中($\lambda \sim L$)的传播。另一方面,平均自由程 Λ 的变化与气体密度的变化成反比。所以在很低压强下,例如在高空或真空室内,即使相当大的流体区域也不能用连续介质模型来描述。今后我们将很少涉及上述的极端情况,而采用连续介质的观点。然而,在应用初等气体分子运动论(即微粒观点)的结果,有助于增强我们对流体运动问题的物理洞察力的地方,我们也将偶尔加以引用。

1) 原文 sound, 直译为声音,但此处非指能听到的声音,应理解为某种高频扰动。——译者注