

A.H. 夏皮罗

可压缩流的 动力学与热力学

(上册)

科学出版社

可压缩流的动力学与热力学

(上 册)

A. H. 夏皮罗 著

陈立子等 译

潘傑元等 校

科 学 出 版 社

A. H. Shapiro
THE DYNAMICS AND THERMODYNAMICS
OF COMPRESSIBLE FLUID FLOW (VOL. I)

The Ronald Press Company, 1953

原著全书分上下二册。上册分为五篇十六章,书中首先叙述了可压缩流的动力学基础,热力学基础,有关的重要概念,一维等熵流,正激波,带有摩擦、换热等因素的一维管流。随后,论述了二维与三维定型无旋流诸基本方程,二维小扰动亚声速流,二维亚声速流的速度图法,二维亚声速流的实验与理论结果,三维亚声速流。在最后一篇中,对二维小扰动超声速流、特征线法、斜激波等作了详细介绍。此外,在上册的附录内,概略介绍了特征线的数学理论,列举了便于数值计算用的可压缩流函数表。在每章后列出了许多重要参考文献,有些章后还附有习题。

本书可供从事空气动力学和实用气体力学的科研工作者以及有关专业的工程技术人员、教师、研究生、高年级大学生等参考之用。

参加本书上册翻译的有陈立子、陈毅章、张仲寅、李宗濂、徐明初、张国富、谭华沛等,由潘傑元、钱翼稷、陆志芳负责校订。

可压缩流的动力学与热力学

(上册)

[美] A. H. 夏皮罗 著

陈立子 等译

潘傑元 等校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1966年5月第一版

开本: 850×1168 1/32

1966年5月第一次印刷

印张: 20 3/16

精装: 0001-2,000

插页: 3

平装: 0001-1,450

字数: 535,000

统一书号: 15031·228

本社书号: 3417·15-6

定价: [科七] 精装本 3.90 元
平装本 3.40 元

原 序

近二十年来,随着高速飞行、喷气发动机、火箭、弹道学、燃烧、燃气涡轮、冲压喷气发动机和其它新型推进器、高速气流中的热交换以及爆震波现象等方面的发展,人们对于可压缩流体运动的兴趣急剧增长。我写这本书的目的在于为大学生、工程师和应用物理学工作者提供一本有关可压缩流体运动的书籍。它不仅要适于作为该领域的一本基础教科书,而且还要宜于作为关于某些较深内容的参考读物。本书题材的选择并不着眼于任何特定的工程领域,而是包括了同下列各方面工作人员有关的论题:航空工程技术人员,机械工程技术人员,化学工程技术人员,应用力学工作者以及应用物理学工作者。

从这一领域的大量文献中选材时,基本宗旨是使本书具有工程实用价值。为此,我一直遵循着这样的观点,即处理可压缩流体动力学最实用的方法是把理论分析、清晰的物理论证以及经验数据结合起来,从相互验证与相互促进来说,它们是彼此依赖的,而结合成的整体的作用优于各部分作用的总和。

本书的分析推导包括两种处理形式,一种导出供设计用的方法,另一种导出一些典范方法。供设计用的方法直接且迅速,很容易应用到各种问题中去,所以它们很适用于工程部门。本书对于这种方法讨论得比较详细而且通常举出示范例题。另一方面,典范方法(包括一些费时间的理论分析)通常需要有数学上的技巧,而且不容易应用到各种问题上。这种方法的主要价值在于能求出少数典型问题的详细解答。虽然这种方法本身并不适用于工程部门,但由它所解得的一些范例却常常能对典型情况下的流动特性提供重要的知识。因此在解决许多甚至所谓设计方法亦无能为力

力的复杂問題时，它可作为設計师的指南。本书对这些典范方法的論述通常是精簡扼要的，同时还介紹用此法所得出的这样一些結果。这些結果能闡明有关流体运动的重要問題，而有助于形成甚为設計工作者所希望的形象化“感觉”。

根据上述精神，本书中的所有重要結果均制成便于使用的图表。除非特別指出，所有图表都是对比热比值 $k=1.4$ 的完全气体作出的。

在本书的基础理論各篇中，重点在于：以清晰方式介紹新概念，在进行理論分析之前先得到清楚的物理解，对物理定律的严格应用以及指出分析思考中的有效途徑。书中其余各篇，为了适合于高年級大学生和专家的技术熟练程度，故闡述比較簡要。

本书由八篇組成。第一篇叙述流体动力学及热力学的基本概念和定理（本书其余各篇均以此为基础），并介紹了可压缩流所特有的某些基本概念。第二篇討論了一些能用最简单的流体运动图案——一維分析——来处理的問題。第三篇概括了以后論述二維及三維流动各章必需的一些基本思想和概念。然后，第四、五、六各篇依次对亚声速流，超声速流（包括高超声速流）以及跨声速流作了較广泛的全面探討。第七篇叙述一維非定型流。第八篇探討了层流及紊流附面层中粘性及导热的效应以及激波与附面层的干扰。在附录 A 中为那些还不熟悉特征綫理論这一內容的讀者扼要地介紹了特征綫法的数学理論。为了便于得出問題的数值解，附录 B 中搜集了常用的各种表格。

希望本书各章后所列的参考文献目录能成为讀者进一步研究內容丰富的各种題材时的有益指南。除了在各章正文中特別注出者外，目录中还包括了与各章主要内容相适应的一般性参考資料。选择文献的主要依据是清楚，完整，并希望是英文文献；而不是根据年份次序。

（下略）

A. H. 夏皮罗

1953.4.4.

目 录

原序.....	iii
---------	-----

第一篇 基础知識

第一章 流体动力学基础	1
1.1 引言	1
1.2 連續介质属性	4
1.3 系統和控制体	10
1.4 质量守恒定律	11
1.5 动量定理	14
1.6 动量矩定理	18
1.7 单位和量綱	19
第二章 热力学基础	23
2.1 引言	23
2.2 热力学第一定律	24
2.3 热力学第二定律	29
2.4 連續介质的热力学属性	34
2.5 用于控制体的第一定律	36
2.6 用于控制体的第二定律	40
2.7 完全气体	40
第三章 可压缩流的基本概念	44
3.1 声速	44
3.2 不可压缩流、亚声速流及超声速流之間的物理差別	48
3.3 馬赫数和馬赫角	53
3.4 相似参数	54
3.5 連續介质的范围	56
3.6 可压缩流的分类	58

3.7 光学研究方法	59
------------------	----

第二篇 一 維 流

第四章 等熵流	70
4.1 引言	70
4.2 等熵流的一般特性	72
4.3 完全气体的絕热流	76
4.4 完全气体的等熵流	80
4.5 等熵流的計算图表	85
4.6 等熵流中的壅塞現象	86
4.7 噴管在变压强比下的工作情况	89
4.8 低馬赫数时的特殊关系式	92
4.9 与完全气体定律的偏差	93
4.10 实际噴管的性能	96
4.11 等熵流的某些应用	98
第五章 正激波	111
5.1 引言	111
5.2 正激波的基本关系式	113
5.3 完全气体中的正激波	116
5.4 計算公式、曲綫和数值表	122
5.5 弱激波	123
5.6 激波的形成	125
5.7 激波厚度	131
5.8 管内正激波	135
5.9 运动激波	138
5.10 收縮-扩张噴管的工作特性	140
5.11 一維超声速扩压器	144
5.12 超声速皮托管	154
第六章 等截面摩擦管流	161
6.1 引言	161
6.2 完全气体的等截面絕热流	164
6.3 长管在不同压强比下的性能	174
6.4 长管內的等温流	180

6.5	实验摩擦系数	185
第七章	有加热或冷却的管流	192
7.1	引言	192
7.2	完全气体的单纯加热关系式	195
7.3	纯 T_0 变化时的壅塞效应	203
7.4	滞止温度变化的突跃波	205
7.5	复温系数	213
7.6	热交换系数	214
第八章	普遍的一维连续流	221
8.1	引言	221
8.2	物理方程及定义	223
8.3	计算公式及影响系数表	228
8.4	比热及分子量不变的流动	231
8.5	流谱的一般特点	235
8.6	一般解法	239
8.7	简单流动形式	241
8.8	摩擦和面积变化联合作用举例	247
8.9	摩擦和热交换联合作用举例	248
8.10	声速点处的特殊情况	262

第三篇 二维和三維流导論

第九章	定型无旋流的运动方程	270
9.1	引言	270
9.2	无旋运动的物理意义	272
9.3	欧拉运动方程	278
9.4	凱尔文定理	283
9.5	气流旋度与气流的热力学属性之間的关系	285
9.6	連續方程	287
9.7	热力学定律	288
9.8	速度位微分方程	289
9.9	流函数微分方程	295
9.10	速度位与流函数間的关系	299

第四篇 亚声速流

第十章 具有小扰动的二維亚声速流	304
10.1 引言	304
10.2 速度位方程的綫化	305
10.3 压强系数的綫化	309
10.4 繞波形壁的流动	312
10.5 戈泰特法則	316
10.6 普朗特-葛勞渥法則	322
10.7 薄翼型的实验結果	327
10.8 风洞修正	329
10.9 二維通道內的流动	331
第十一章 二維亚声速流的速度图法	338
11.1 引言	338
11.2 速度图方程的推导	340
11.3 切綫气体近似法	344
11.4 卡門-錢学森压强系数修正公式	346
11.5 翼型形状修正的計算	353
11.6 卡門-錢学森方法的推广	359
11.7 杂例	360
第十二章 二維亚声速流的各种解法和結果	367
12.1 引言	367
12.2 展成馬赫数的級数的瑞利-詹森法	368
12.3 展成形状参数的級数的普朗特-葛勞渥方法	374
12.4 松弛法	380
12.5 亚声速流中压缩性效应的某些測量結果	382
12.6 流綫曲率法	390
第十三章 三維亚声速流	396
13.1 引言	396
13.2 直匀流具有小扰动时的戈泰特法則	397
13.3 繞椭球的流动	401
13.4 旋成体	404
13.5 圓球	411

13.6	有限翼展机翼	412
13.7	后掠翼	417
13.8	有限翼展后掠翼	422

第五篇 超 声 速 流

第十四章	二維小扰动超声速流	428
14.1	引言	428
14.2	方程組的綫化	430
14.3	綫化超声速流的通解	430
14.4	通解的几何解釋	436
14.5	繞波形壁的流动	439
14.6	超声速翼型	441
14.7	波的反射和相交	450
第十五章	二維超声速流的特征綫法	463
15.1	引言	463
15.2	由綫化理論推广的一族波流动	464
15.3	由綫化理論推广的两族波流动	478
15.4	特征綫理論的应用	483
15.5	按特征綫理論得出的簡單波	490
15.6	区域法和节点法	492
15.7	单元过程	494
15.8	图解法和数值法	495
15.9	超声速流的一些特点	499
15.10	特征綫法的应用	502
15.11	超声速风洞噴管的設計	509
15.12	絕热无粘性有旋流	518
第十六章	斜激波	531
16.1	引言	531
16.2	斜激波方程	533
16.3	激波的几何图形	541
16.4	激波极綫	544
16.5	斜激波的某些特殊問題	546

16.6	极弱激波	553
16.7	激波的反射和干扰	556
16.8	曲激波	562
16.9	利用级数展开的显式解	564
16.10	带有激波的二維流举例	566
16.11	二維翼型	570
16.12	激波与附面层的干扰	583

附 录

附录 A	特征綫理論	597
A. 1	引言	597
A. 2	特征綫	600
A. 3	繪制特征綫的方法	605
A. 4	简单波	608
附录 B	可压缩流函数表	612
B. 1	标准大气属性	615
B. 2	等熵流($k=1.4$)	617
B. 3	正激波($k=1.4$)	625
B. 4	有摩擦的等截面絕热流(范諾綫), $k=1.4$	630
B. 5	滯止温度变化的等截面无摩擦流(瑞利綫), $k=1.4$	632
B. 6	影响系数($k=1.4$)	634
B. 7	二維等熵超声速流的速度图特征綫函数($k=1.4$)	636
B. 8	二維超声速流二級近似理論中的諸系数($k=1.4$)	637

第一篇 基础知識

第一章 流体动力学基础

1.1 引言

象流体动力学这样一門工程科学，是既以理論又以实验为基础的。流体动力学的发展尤其依赖于解析和实验这两个分支的紧密结合；实验结果能够极有成效地用理論推理来解释，而理論分析則又反过来提出用以檢驗和說明理論的实验，以进一步充实与加强理論。

一門科学的解析分支是由概念、定义和物理定律的陈述所构成的。后者通过概念和定义表达出来，且和实验观察相一致。所有关于可压缩流体运动的分析，都必须直接或間接地从陈述支配这些运动的四条基本物理定律出发。这些定律与个别流体的属性无关，它們是：

- (i) 质量守恒定律；
- (ii) 牛頓第二定律；
- (iii) 热力学第一定律；
- (iv) 热力学第二定律。

除了这些基本定律外，在分析中通常还必须引入某些輔助定律，它們和所研究的个别流体或某一类流体有关。例如，完全气体¹⁾

¹⁾ “perfect gas”在热力学书中一般称为理想气体，但在气体动力学书籍中，为了与无粘性的“理想流体”区别起见，一般把服从克拉貝隆方程的气体称为“完全气体”。——校者注

的状态方程、牛頓流体中剪应力和剪变形率之間的正比定律、傅利叶导热定律等。

本书重点放在如何从上述四条基本定律出发，用分析方法得出重要結論。因此，前两章复习这些定律及有关的概念和定义。按照这种方式，建立起本书的一般观点和写法。

流体的定义 用各种方法对物质进行严格的分类通常是不成功的，这是因为某些物质表現得是如此不規則，以至于不能确切地将其归入某一类中。但对我们說来，主要的只是希望把我们称之为流体的一大群普通物质和其它物质（如固体和塑性体）区别开来。

我們將流体定义为在剪力作用下連續变形的物质。当剪力作用于固体时，固体就受到一定程度的变形，只要作用力保持不变，变形也就不变。但流体就不同了，無論是有粘性的或无粘性的流体，只要受到剪力作用，在其各微元部分之間必显示出相对运动。因此，我們說“流体不能抵抗剪应力”。

从流体的定义可得到一条重要的推論：如果在流体内部沒有相对运动，亦即流体微团沒有变形，那末，就不可能有剪应力作用在那些微团上。

液体和气体 试图用通常方法来严格地区别同属于流体的液体和气体是徒劳无益的，而且的确沒有任何实用意义。这可以从下列事实看出：在被活塞所封閉的玻璃汽缸中，处于1大气压和 100°C 下的一定质量的“水”，通过适当的热交换和活塞运动，可以轉变成在1大气压和 100°C 下的同样质量的“蒸汽”，而过程中根本看不到两相間的弯月面！对于大多数实用目的來說，“液体”和“气体”两詞只在下述情况才有意义，即前者是指通常密度改变百分率很小的流体。

本书的主题大多是討論可压缩程度很高的流体，所以我們一般都說气体。

連續介质概念 外观上連續的物质是由处在不断运动和碰撞中的无数分子組成的。所以，分析聚合物质运动的最基本方法

是对每个个别的分子写下运动定律，并追踪每个分子或统计的分子群在某初始状态后的经历。这种研究方法，通常称为分子动力学或统计力学，它有显著的优点，但在另一方面，对实际计算又常常显得太麻烦。

在大多数工程问题中，我们的主要兴趣不在于各个分子的运动，而在于当把流体看作一种连续物质时的整体性态。虽然连续流体假设只是一种方便的构想，但对于许多实际问题来说，由于重要的仅仅是宏观的或表象的知识，所以，它仍然是一种有效的方法。只要我们所感兴趣的最小的流体体积内包含有足够多的分子，从而使统计平均值有意义，那么，可以说，把流体作为连续介质来处理是正确的。

由连续介质概念所带来的最大简化是：我们不必研究无数分子的瞬时状态，而只要研究描述物质整体性态的某些宏观属性就行了。在可压缩流体的运动中，有关的属性为：密度、压强、剪应力、速度、粘性系数、温度、内能、熵和导热系数。这些量都在1.3节和2.4节中予以定义。

本书研究可看作连续介质的可压缩流体的运动。为了避免这样的印象，即本书的方法和结果是普遍地有效的，在此指出这样一点看来是适当的，即当分子的平均自由程和问题所涉及的最小有效尺寸可以相比拟时，宏观的研究方法就不适用了。因此，当我们研究非常稀薄的气体时（如火箭在非常高的高空中飞行，高真空技术或电子管中），经典流体力学和热力学的连续介质方法必须予以舍弃，而采用分子动力论的微观方法。

符 号

a	加速度	g	单位质量的物体力值
A	面积	g_0	牛顿第二定律中的比例常数
$\mathbf{A}$	面积向量	m	质量
F	力	M	力矩或力偶
$\mathbf{F}$	力向量	p	单位面积上的法向力，或压强

r 向徑的模

$\mathbf{r}$ 向徑

t 時間

u x 方向的分速

v y 方向的分速

$\mathcal{V}$ 体积

V 速度

$\mathbf{V}$ 速度向量

w 质量流量

x, y, z 直角坐标

γ 角度

μ 粘性系数

ρ 一点处的质量密度

τ 单位面积上的剪切力, 或剪应力

1.2 連續介质屬性

在这里, 我們討論連續介质的一些与运动定律有关的属性.

一点处的密度 我們来考察連續流体中包圍着点 P 的体积 $\delta\mathcal{V}$ 中的流体质量 δm (图 1.1a). 比值 $\delta m/\delta\mathcal{V}$ 称为体积 $\delta\mathcal{V}$ 內流体的平均质量密度. 首先假設 $\delta\mathcal{V}$ 比較大, 以后, 圍繞点 P 使其縮小, 于是 $\delta m/\delta\mathcal{V}$ 对 $\delta\mathcal{V}$ 的曲綫便由图 1.1b 表示. 起初, 平均密度趋近于一漸近值, 因为該体积內所包含的流体在性质上愈来愈均匀. 但是, 当 $\delta\mathcal{V}$ 变得这样小以致只包含着少数几个分子时, 因为分子进入与跑出該体积, 故平均密度显著地随着時間而振蕩, 所以 $\delta m/\delta\mathcal{V}$ 就不可能有确定的数值. 于是我們可以設想一个还能够把其中的介质看作連續介质的最小体积 $\delta\mathcal{V}'$, 并把一点

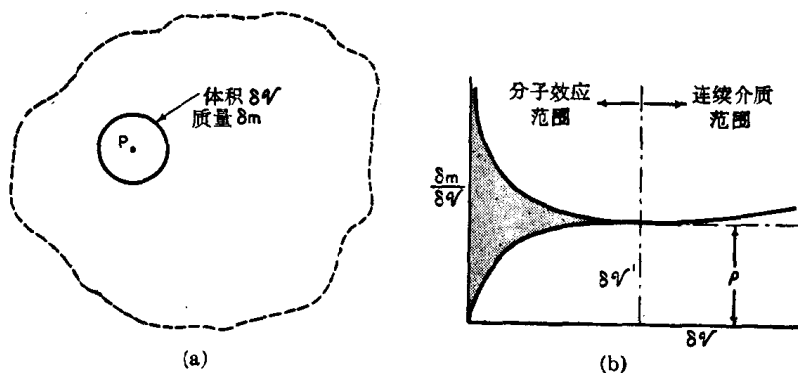


图 1.1 一点处的密度的定义

处的密度定义为

$$\rho \equiv \lim_{\delta V \rightarrow \delta V'} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1.1)$$

这个定义反映了連續介质的思想,并且作为一种虚构的、然而是非常有用的概念,它表明了“一点处”連續介质属性的实质。

一点处的流体速度 一点处的流体速度和最靠近該点的分子的瞬时速度完全无关。較恰当地說,我們考虑瞬时包圍該点的体积 $\delta V'$ (图 1.1b) 的重心的运动,并且把点 P 处的流体速度定义为这个重心的瞬时速度。因此,一点处的流体速度就是在某瞬时正通过該点的流体微团的瞬时速度。这里所謂流体微团是指尺寸可和 $\delta V'$ 相比拟的确定的微小流体质量。

这样看来,一点处的密度是一个标量,而一点处的流体速度却是一个向量。所以,在引入某坐标系后,即可将速度向量分解为三个标量分量。

流綫 在任何瞬时,連續流体介质的每一点都有一个相应的速度向量。处处与速度向量相切的曲綫称为此流場的瞬时流綫,而且是流場的一种最普通、最有用的图形表示法。当我们談論流譜时,通常是指流綫图形。

在非定型流中,流綫图形是随着時間改变的。但如果流动是定型的,則流綫不随時間而变,并且也就是軌綫或流体微团的軌迹。

流管 我們来考察与某点的速度向量相垂直的微元面积 dA 。通过 dA 周綫的流綫形成一張表面,称为流管。因为没有垂直于流綫的分速,所以,流管壁可以看作是流动不能透过的壁。

一点处的应力 我們来考虑連續介质中一个沿給定方向通过点 P 的平面(图 1.2),并設想此平面中包圍点 P 的一个圓面积 δA 。由經驗得知,此表面一側的流体必施力于另一側的流体;同时,按牛頓第三定律,后者对前者必作用有数值相等而方向相反的力。这样的力称为表面力。

正应力 作用于面积 δA 上的表面力可以分解为一个垂直

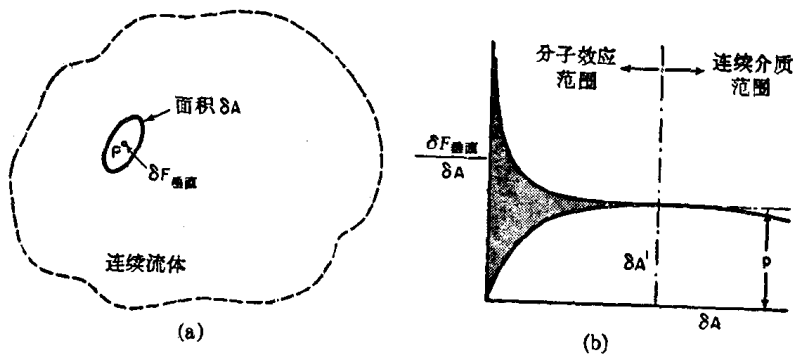


图 1.2 一点处的正应力的定义

于 δA 的分力和一个位于 δA 平面内的分力。首先考虑垂直分力，参看图 1.2 b，我们把点 P 处沿此给定方向的流体压强定义为单位面积上垂直分力的极限：

$$p \equiv \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_{\text{垂直}}}{\delta A} \quad (1.2)$$

剪应力 类似地，剪应力 τ 定义为作用于 δA 上的单位面积的切向分力的极限：

$$\tau \equiv \lim_{\delta A \rightarrow \delta A'} \frac{\delta F_{\text{切向}}}{\delta A} \quad (1.3)$$

当然，压强和剪应力都是向量。

应该注意，面积 $\delta A'$ 和体积 $\delta V'$ 具有可以相比拟的尺度。

流体静压强 现在我们提出这样一个问题，即点 P 处的压

强(或正应力)是否依赖于平面 δA 的方位。

为了回答这个问题，让我们首先考虑无粘性流体，对于这种流体，其内部即使有相对运动，也不存在粘性应力(切应力或剪应力)。为了使数学处理简化起见，假设只考虑二维的情形，于是我们就来研究图

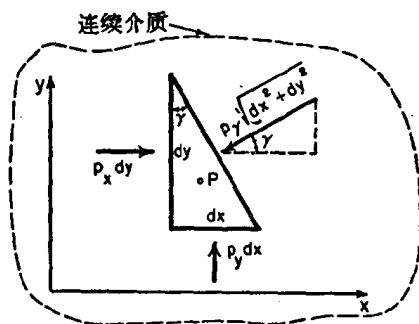


图 1.3 作用在一点处的法向应力