

气体动力学的 理论与应用

[美] G·伊曼纽尔 著
周其兴 周静华 译
李之江 校



374018

气体动力学的理论与应用

〔美〕 G. 伊曼纽尔 著

周其兴 周静华 译

李之江 校



宇航出版社

(京)新登字181号

2.38/119
内 容 简 介

《气体动力学的理论与应用》一书共分两部分：第一部分介绍了热力学诸定律、守恒方程、激波膨胀波以及定常和非定常一维流动等。第二部分对激波、二维流动等作了深入论述，并讨论了一些有实用意义的新颖课题。本书取材、编排独特、理论系统阐述严谨，与实际结合密切，列有大量例题和习题。

本书可作为大学高年级学生和研究生参考教材，又可供从事航空航天实践工作的工程科技人员参考。

Gasdynamics; Theory and Applications
George Emanuel
Copyright 1986 by the American Institute of
Aeronautics and Astronautics, Inc.

气体动力学的理论与应用

〔美〕G.伊曼纽尔 著

周其兴 周静华 译

李之江 校

责任编辑：高 凌

宇航出版社出版发行

（北京和平里滨河路1号 邮政编码100013）

各地新华书店经销

北京交通印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：11.375 字数：303千字

1992年3月第1版 第1次印刷 印数：1—1000册

ISBN 7-80034-354-5/V·119 定价：19.50元

序

G.伊曼纽尔(G.Emanuel)编写的《气体动力学的理论与应用》是美国航空航天学会(AIAA)出版的教育丛书序列中的第七部。丛书包括课本和专著,内容涉及到航空航天广阔领域各个学科的理论与应用,包括航空航天器的工程设计。丛书既开发教学用书,又为从事实践工作的工程技术人员、科学家提供所需用的参考资料。本书正是针对这两方面的需要而编撰的。

伊曼纽尔论述了气体动力学各个重要方面的课题,特别着重于可压缩流的理论与应用。本书分两部分:第一部分论述热力学诸定律、守恒方程、定常管流、正激波和斜激波、普朗特-迈耶(Prandtl-Meyer)流动和激波膨胀波理论、喷管流动和扩散器流动、热传导以及非定常一维流动;第二部分论述一些新颖的课题,如激波、二维流动、特征线理论、气动窗、有激波时的线流以及高升力飞行器空气动力学。

本书为大学高年级学生和研究生教科书,而且又可作为从事航空航天实践工作的工程技术人员的参考书。它是一部很有价值的专著。

AIAA教育丛书主编:

J.S.Przemieniecki

前 言

《气体动力学的理论与应用》用新的叙述方法介绍一些传统的资料，如第九章、第十章的非定常流和第十五章的锥型流。本书第二部分的内容，在其它书本中，几乎是找不到的。

本书第一部分适于作大学高年级课程的参考教材。为了帮助学习，各章安排了很多例子。附录里简要归纳了有关内容。

第二部分适于作研究生第一年第一学期学习的参考教材。以第一部分的内容为基础，着重于分析。本书（特别是第二部分）揭示了一些尚未解决的课题或疑难问题，使读者认识到，气体动力学是一门不断发展、前进的学科。

第二部分的内容，可为其它高深课程〔如跨声速、高超声速流动，特别是计算流体力学(CFD)〕提供有用的背景资料。或者说，第二部分的那些在其它书本中难以找到的材料，填补了传统流体力学和CFD之间的空白，使本书成为服务于这两个分支学科的有效参考书。

《气体动力学的理论与应用》虽然不是CFD教程，却包含了CFD方面的很多重要的专题，如雅可比理论、均齐性、守恒性等，书中对这些专题作了专门论述。对一般性的课题，如激波、锥型流和特征线理论等，大体上也是按CFD的要求叙述的。

《气体动力学的理论与应用》一书重点阐述了超声速气体动力学。全书按无粘、绝热的连续流处理，不计质量力。因此，本书不讨论粘性层、磁流体力学和稀薄气流问题，而力图处理好理论与应用之间的关系。应用，往往在于验证有关假设，诸如无化学反应、无辐射、无扩散的完全气体和定常二维或轴对称流动假设的可靠性。理论，则是对某些现象经简化处理后，提炼出适用

于一定条件下的基本规律。

各类习题基本反映了本书的主要内容。通过做些难题和演算一些需要进行理论推导的题目，来提高处理各类问题的能力。

有些习题的求解需用到可编程程序的计算器。这类习题都予以分开编列。本书没有收入一般气体函数表，望读者自己制作所需的数表。有关制表的习题放在第4~9章计算题前。完成这些习题后，便能用数表做作业。附录C~K概括了各章的内容，读者可查阅附录中已表格化了的方程式。

作者感激作为朋友又是同事的M.L.拉斯马森(M.L. Rasmussen)教授给予的鼓励。感谢F.莫斯莱希(F. Moslehi)协助审校原稿。尤其要感谢俄克拉何马(Oklahoma)大学这些年来给予慷慨的支持，致使本书能够得以出版。作者对书中的任何遗漏完全负责，欢迎指正。

G.伊曼纽尔

目 录

前 言

第 一 部 分

第一章 绪论	(1)
第二章 热力学	(4)
2.1 热力学第一定律	(4)
2.2 状态变量	(6)
2.3 熵	(7)
2.4 相关性	(9)
2.5 状态方程	(11)
2.6 比热	(13)
2.7 等熵过程	(17)
2.8 热力学第二定律	(19)
2.9 声速	(19)
习题	(22)
第三章 一维守恒方程	(25)
3.1 管流	(25)
3.2 物质导数	(26)
3.3 守恒方程	(28)
3.4 熵的变化	(34)
3.5 声学浅析	(34)
3.6 小结	(38)
习题	(39)
第四章 定常管流	(42)
4.1 基本方程的积分形式	(42)
4.2 等熵关系式	(44)
4.3 面积和质量流率	(47)

习题	(50)
第五章 正激波和斜激波	(52)
5.1 定常正激波	(52)
5.2 斜激波	(60)
习题	(68)
第六章 普朗特-迈耶流动和激波-膨胀波理论	(73)
6.1 普朗特-迈耶流动	(73)
6.2 激波-膨胀波理论	(81)
习题	(86)
第七章 喷管和扩散器流动	(93)
7.1 喷管流动	(94)
7.2 扩散器流动	(106)
习题	(114)
第八章 变截面、有热传递和摩擦的管道	(120)
8.1 影响系数法	(120)
8.2 瑞利流	(129)
8.3 费诺流	(142)
习题	(151)
第九章 非定常一维流动	(159)
9.1 正激波	(159)
9.2 反射正激波	(166)
9.3 特征线法	(170)
9.4 非定常膨胀波	(176)
习题	(189)
第十章 非定常一维流动的应用	(195)
10.1 激波管流动	(195)
10.2 活塞膨胀管(PISTON EXPANSION TUBE)	(203)
习题	(210)

第 二 部 分

第十一章 方程组	(212)
11.1 体积变化	(212)
11.2 守恒方程	(213)

11.3 守恒方程的形式	(215)
11.4 边界条件和初始条件	(217)
习题	(218)
第十二章 激波	(219)
12.1 一维流动	(219)
12.2 斜激波	(221)
习题	(227)
第十三章 守恒方程的转换	(230)
13.1 一般理论	(230)
13.2 定常二维或轴对称流动-I	(238)
13.3 定常二维或轴对称流动-II	(243)
13.4 自然坐标系	(256)
13.5 速矢端图转换	(258)
习题	(261)
第十四章 定义和定理	(266)
14.1 基本概念	(267)
14.2 流函数和势函数	(272)
14.3 守恒方程的齐性	(279)
习题	(285)
第十五章 完全气体定常均熵流动的精确解	(289)
15.1 结论	(289)
15.2 螺旋流(SPIRAL FLOW)	(290)
15.3 绕圆锥的超声速流动	(292)
习题	(297)
第十六章 特征线理论	(299)
16.1 定常二维或轴对称流动	(299)
16.2 相容性和特征方程	(306)
习题	(321)
附录A SI单位和术语	(324)
附录B 热力学摘要	(330)
附录C 管流方程	(332)
附录D 正激波和斜激波摘要	(333)
附录E 激波角 β 与气流偏转角 θ 的关系	(334)

附录F	普朗特-迈耶流动摘要	(336)
附录G	微波-膨胀波摘要.....	(338)
附录H	喷管流动摘要.....	(340)
附录I	变截面、有热传递和摩擦的管道流动方程摘要	(341)
附录J	瑞利流摘要	(342)
附录K	费诺流摘要	(343)
附录L	非定常正激波摘要	(345)
附录M	反射激波摘要.....	(346)
附录N	雅可比理论	(347)

第 一 部 分

第一章 绪 论

人们对气体动力学这个学科的研究，深受早期发展的超声速风洞的影响。理论研究领先于实际应用几十年。事实上，在超声速飞行、大推力火箭发动机喷管技术等方面的应用到50年代后才臻于成熟。很多好的教科书到50年代才第一次问世。那时，气体动力学已列入力学和航空航天工程的教学课程。

本书研究的对象是可压缩的气体运动。诚然，液体和固体也是可压缩的，但其压力的极大变化，只能引起其密度的微略改变。对于气体，情况就不同了，压力和密度二者变化的量级相差不大。具体说，当气体速度变化很可观时，其压力只需变化两倍即可。

马赫(Mach)数用来作为衡量流体压缩性的无量纲参数。它是流速和声速之比值。早期教材所规定的可压缩流与不可压缩流之间的区分，通常以马赫数约为0.4来划分的。飓风、龙卷风之类的自然现象，其峰值马赫数低于0.4，属于不可压缩流的范畴。商用飞机正常航行时，马赫等于0.8或还略高一些。这时空气的压缩性效应是明显的。

然而，实际上只有当马赫数大于1以后，压缩性才起显著作用。这种流动称为超声速流动。产生推力的火箭发动机喷管出口处的流动是超声速流动。燃烧室里的密度和压力比喷管出口平面上的密度和压力大几个数量级，这种变化可在几毫米的距离范围

内出现。

气体动力学的应用是多方面的，包括涡轮内气体的流动、气体激光器、气动窗、高升力飞行器空气动力学、喷气发动机及坠入大气层的物体(如陨石之类)的绕流等。显然，多数应用问题已为人类所掌握。雷击是自然界中的普遍现象，其压缩性很重要。雷击的产生是因为它本身释放了大量的能量(也就是发光)。能量的突然释放，产生激波，以超声速向外传播。假如我们接近光源，则激波产生的压力扰动，听到的只是一阵急促的爆裂声，而不是人们所熟悉的雷鸣轰隆声。

密度和压力的急剧变化与超声速流动及激波相关联。激波是超声速流动中的一个强间断面，使流动突然降低速度。激波反映气体动力学的主要特征，对此应引起特别重视。

任何物质状态都受热力学支配。如果是不可压缩流动，通常可以不考虑热力学问题，此时认为密度不变。然而，在可压缩流动中，状态会发生明显变化，这时不能再忽略热力学问题了。热力学主要涉及到两方面的内容，即热力学第一、第二定律和状态方程。可压缩流要求综合热力学和力学两方面的问题。在力学方面，主要应用质量守恒原理和动量守恒原理。

在早期的流体力学课程中，通常只运用动量原理或质量守恒原理来分析不可压缩流动问题。一般来说，这对可压缩流动是不够的。还需用到所有守恒定律和热力学状态方程才能求得解答。由于问题的复杂性，将会出现某种新的现象。

根据气体动力学在各方面的应用情况，可对一些复杂问题进行简化。如可假设一种无质量力或无粘性力的连续流动。连续流假设意味着气体分子不作为单个的粒子处理。不计质量力，意即忽略重力的影响，同时气体不致于被热到足以发生明显的电离。不计粘性力的假设是有限制的。在无粘流中，不能利用实际上无滑移的物面条件。不计粘性力的近似处理办法对大部分气体介质是合适的，只是在接近物面很薄的边界层内才失效。对作用在飞行器或在气体中高速运动物体上的力来说，无粘假设往往是合理

的。因为在这种情况下，压力一般大大超过粘性力。

热力学的基本假设认为流体是热(thermally)或量热理想气体(calorically perfect gas)。对单原子和双原子气体来说，作这种近似很切合实际。尤其在室温状态下更合适。特别对空气来说，多数应用中用完全气体假设来描述很合理。

气体动力学学科由三个分支组成，即理论气体动力学、计算气体动力学和实验气体动力学。虽然本书对计算气体动力学和实验气体动力学也作些讨论，但主要是论述理论气体动力学。例如特意把方程式列成适合计算用的形式；有些习题要求运用可编程程序的计算器。

书中一般用70年代使用的国际单位制(SI)。对于压力偶尔也用到别的通用单位。附录A列出了简单的SI表格。一般情况下，采用无因次方程形式，此时，单位的选择就不重要了。附录里还给出了一些名词术语。

第二章 热 力 学

热力学主要涉及两个课题：物质的状态；能量从一种形式向另一种形式转换。这两个课题密切相关，能量的转换必将引起状态的变化。

本章讨论的热力学问题，是学习后续各章所必备的基本知识。附录B归纳了本章若干重要结果。

2.1 热力学第一定律

热力学系统是指与周围环境相隔离的一个能量和物质的区域。但这样定义对我们所讨论的问题来说太一般化了。我们所关心的只是一个简单的封闭系统。在该系统中，物质均匀、各向同性，而且不考虑化学反应、电磁效应和重力场作用。在封闭系统中，系统界面的任一方向没有质量通过。

单位气体质量是指一个简单封闭的热力学系统含有一个单位质量的气态物质。在系统的边界面上没有扩散或对流方式的质量通过，但可有出入系统的能量转移（例如，热传导、能量的辐射传递，或转动叶轮）。此外，外界可对系统做功，系统也可对外界做功。功通过系统边界面由系统推压外界或被外界推压而完成。因此，该系统与外界的相互作用只能通过两方面进行：能量传递或做功。

现将上述的传递机理与系统物质特性联系起来。显然，进入系统的热量会以某种方式改变系统的状态。能量传递与系统状态之间的关系由热力学第一定律确定。第一定律建立了热传递和做功的微量变化与简单封闭热力学系统的内能之间的关系，用最基

本的形式表示为

$$de = dq + dw \quad (2.1)$$

方程(2.1)中

e = 比内能,

q = 进入单位质量气体的热量,

w = 对单位质量气体作的功。

“比”的含义表示该参数对单位质量而言,小写字母如 q , w 表示单位质量系统的参数。 dq 为正时,向系统加热。同样, dw 为正时,对系统做功。正的 dq 、 dw ,使内能增加。

方程(2.1)是能量守恒的表达式。这里的能量一词有二重意义。它是与守恒的周围环境的能量连系在一起的系统的能量。

现用一个无摩擦的活塞-气缸装置(如图2.1所示)推导机械功的表达式。容积 V 内有质量为 m 的气体,组成一个封闭的热力学系统,定义比容积为

$$v = V/m$$

或表示成微分形式

$$dV = m dv \quad (2.2)$$

容积还可由下式给出

$$V = A(x_0 - x)$$

式中 A 是活塞表面面积, x_0 是常数,微分后得

$$dV = -A dx \quad (2.3)$$

从方程(2.2)和(2.3)中消去 dV 得

$$dx = -\frac{m}{A} dv \quad (2.4)$$

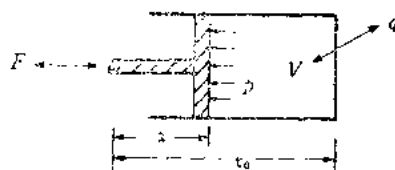


图2.1 无摩擦的活塞-气缸装置

不计摩擦，不考虑活塞质量，不计外界（或环境）压力，那么活塞上的压力为

$$F = pA \quad (2.5)$$

式中 p 是容积 V 内的气体压力。根据力学原理，对系统作的功（单位质量气体），其微分形式为

$$dw = \frac{F}{m} dx$$

用式(2.4)和(2.5)消去 F 和 dx ，得到

$$dw = \frac{1}{m} \left(pA \right) \left(-\frac{m}{A} dv \right) = -p dv \quad (2.6)$$

因而第一定律的表达式变为

$$de = dq - p dv \quad (2.7)$$

用 $-p dv$ 取代 dw 必须是一个无限小的可逆过程。此时，要求活塞作缓慢运动，使整个容积内的气体压力几乎均匀*。

2.2 状态变量

现讨论一个由均匀气体构成的简单热力学系统。系统的状态由比容积 v 、压力 p 和内能 e 等变量来描述。所谓状态变量，是指其值与系统历程无关的参量。因此，状态变量（或参数）所表明的只是系统的现时状态，而不反映在此之前所发生的历程。

状态变量反映系统内涵的特性，与系统的尺寸、重量或构形无关，这一点很重要。 v 、 p 、 e 都是系统内涵的状态变量。

状态变量更确切的定义是，两个端点状态之间的积分只与端点的状态有关。如压力与比容积即是状态变量，因为

$$\int_1^2 dp = p_2 - p_1, \quad \int_1^2 dv = v_2 - v_1$$

式中标记的 1 与 2 表示两个端点状态。这个积分不需知道状态 1

* 如果活塞急速地作压缩气体的运动，就要产生激波。激波前后的压力不同，系统不再是均一的。因而整个系统不是单一的，也不是接近于平衡状态的。

和 2 之间的过程。而 w 与 q 不是状态变量，因为

$$\int_1^2 dw \neq w_2 - w_1, \quad \int_1^2 dq \neq q_2 - q_1$$

此积分必须用到描述实际过程的路径。

在简单的热力学系统中，均匀气体的状态只取决于两个内涵状态变量。因此，内能由压力和比容积所决定，即

$$e = e(p, v)$$

因可随意选用两个状态变量，故还可写成

$$p = p(e, v)$$

或

$$v = v(e, p)$$

第四个重要状态变量是温度 T 。此外，可能要用到密度 ρ 和焓 h ，它们由下式定义

$$\rho = 1/v \quad (2.8)$$

$$h = e + pv = e + (p/\rho) \quad (2.9)$$

因 w 和 q 都不是状态变量，需用只含有状态变量的表达式替换方程(2.1)中的微分项 dw 和 dq 。(2.1)节借助活塞-气缸装置进行了推导，求得了用状态变量代替 dw 的方程式(2.6)。下一节，将要用只含状态变量的表达式取代 dq 。

2.3 熵

任何实际过程都是不可逆的。它的唯一特点是有能量损失，如由摩擦引起的热损失，或由有限温差造成的热传递损失。

在许多过程或过程的某一部分中，能量损失是可忽略的。喷管中的气体流动(除了壁面上很薄的边界层外)属于这样的过程。当能量损失可忽略时，就是一个可逆过程。(2.1)节中所描述的活塞-气缸过程属于这样的过程。因活塞的运动是无摩擦的，同时要求活塞作缓慢地运动。有了这些条件，气体中的粘性损失可忽略不计。

讨论可逆过程是要从第一定律的表达式中消去 dq 。为此，通