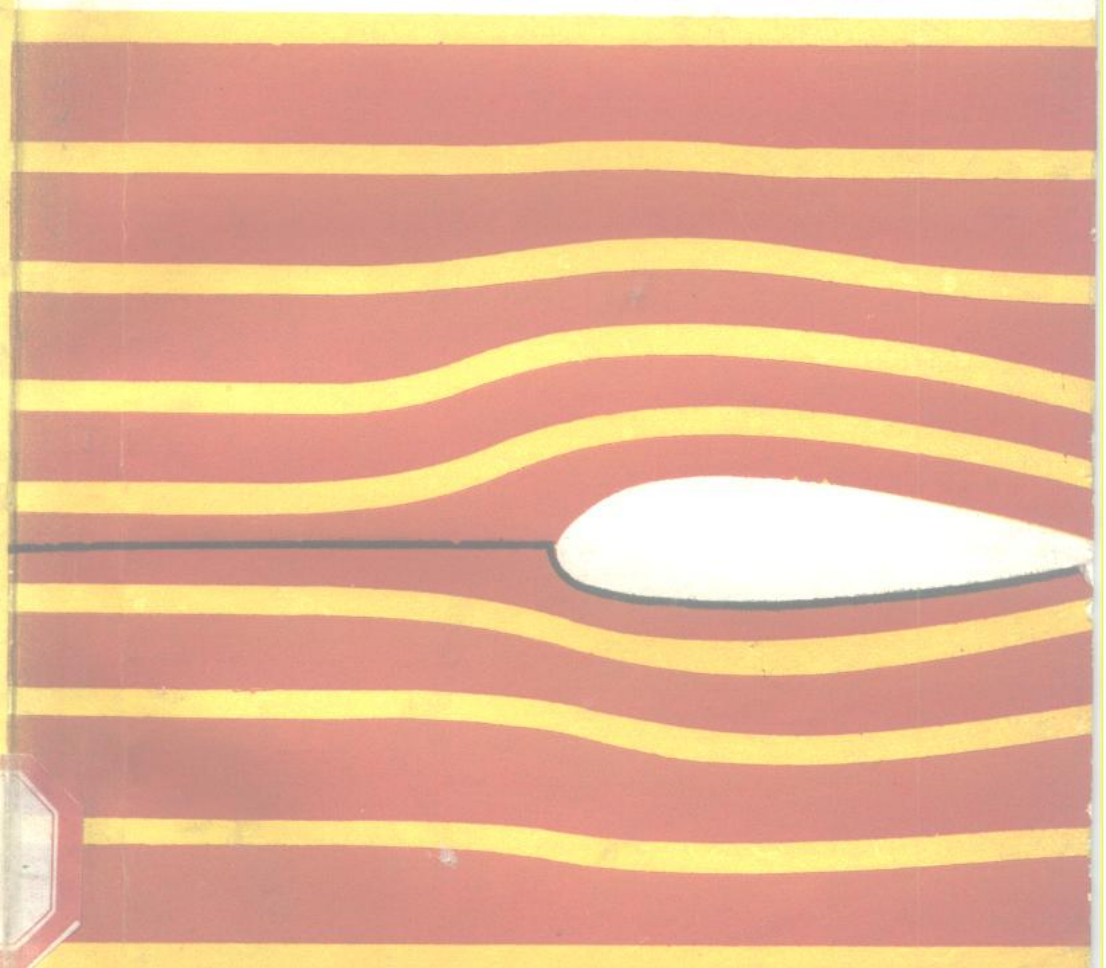


气体动力学

罗曼芦 主编 王兆华 审阅



上海交通大学出版社

气 体 动 力 学

罗曼芦 主编

王兆华 审阅

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍可压缩流体流动的基本理论及其应用。内容有：一维定常流动理论；一维定常变截面管流；绝热有摩擦管流和有换热管流；超音速流动的膨胀波、正激波和斜激波；多维流动的气动力学基本方程、小扰动法和特征线理论；叶栅理论；叶栅绕流问题的保角变换法和奇点法等。

本书可作为大专院校热能动力机械专业和气动机械专业等的教材使用，也可供有关专业的工程技术人员参考。

气 体 动 力 学

出版：上海交通大学出版社

（淮海中路1934弄19号）

发行：新华书店上海发行所

印刷：常熟文化印刷厂印刷

开本：850×1168（毫米）1/32

印张：11·25

字数：287000

版次：1989年5月第1版

印次：1989年6月第1次

印数：1—2100

科目：193—277

ISBN7-313-00456-7/TK

定价：2.55 元

前 言

气体动力学是热动力机械专业及相关专业的一门专业基础课程。本书是在几年教学与实践应用的基础上经多次修改后编写的,为学习动力机械、叶片机原理和其他动力设备的气体动力学问题提供必要的基础知识。

本书阐明了可压缩流体流动的基本理论及其应用。在工程热力学和流体力学的基础上,建立气动力学基本方程及气动函数,重点研究一维定常流动的理论。对一维定常管流讨论了截面变化对气流参数的影响,绝热有摩擦管流和有换热的管流。对超音速流动的膨胀波、正激波和斜激波都作了比较详细的讨论。对多维流动还介绍了气动力学基本方程、小扰动法和特征线理论。最后介绍了叶栅理论和计算不可压缩平面叶栅绕流的保角变换法和奇点法。本书各章都编排了一定数量的、结合实际例题和习题,以帮助读者运用基本理论分析和解决实际问题。

本书由上海交通大学罗曼芦,邵震,林文光合编。第1、2、3、6、7、9章由罗曼芦编写,第4章由邵震编写,第5章由林文光编写,第8章以邵震为主由三人合编。本书由罗曼芦主编,上海交通大学王华华教授审阅。

在本书编写和审定过程中,上海交通大学动力机械工程系的钟芳源教授和很多同志都曾给了我们热情的支持和帮助,在此表示由衷的感谢。

限于编者水平,书中不妥和谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

1988年9月

基本符号

b	叶弦, m
c_L, c_y	升力系数
c_p	定压比热, J/(kg·K); 压力系数
c_v	定容比热, J/(kg·K)
C_x	阻力系数
D_H	水力直径, m
D_{sh}	波阻
E	总能量, J
E_k	动能, J
E_p	位能, J
f	摩擦系数; 流动的复势 $f(z)$
h	焓, J/kg
i	冲角, (°)
l	特征长度, m
m	质量, kg
\dot{m}	质量流量, kg/s
M	马赫数
\bar{M}	气体分子量, kg/(kg·mol)
n	分子自由度
P	管道湿周, m; 作用力, N
q	单位质量气体的热量, J/kg
Q	热量, J; 点源(汇)

\dot{Q}	经过控制体表面热流量, J/s
R	气体常数, J/kg·K
\bar{R}	通用气体常数, J/(kg·mol·K)
Re	雷诺数
S	熵, J/K; 流线的矢量方向
u	单位质量气体的内能, J/kg;
U	内能, J
\vec{W}	复速度
W'	广义功, J
\dot{W}	控制体对外所作之功率, J/s
X	流体具有的质量、动量或能量
β_0	安装角, (°)
γ	比热比
Γ	速度环量
δ	偏转角, (°)。边界层厚度, m
θ	转折角。翼型弯曲角, (°)
ϕ	速度势函数。扇形角
φ	速度系数
ψ	流函数
ζ	变换平面
ξ	ζ 平面的分坐标轴
η	ζ 平面的分坐标轴
τ	切应力, Pa
μ	动力粘性系数, Pa·s; 马赫角
ν	运动粘性系数, m ² /s
$\nu(M)$	普朗特-迈耶角, (°)
λ	无量纲速度(速度系数)

ρ 密度, kg/m^3

下角标:

- 1, 2 起始和终了状态
- 1.2 起始至终了状态间的参数
- a 大气状态
- b 背压状态
- e 出口截面状态
- m 平均值
- n 法向分量
- o 滞止状态
- p 叶凹面
- s 叶背面。沿流线方向分量
- t 喉口截面状态
- w 壁面状态
- x x 轴分量; 激波前参数
- y y 轴分量; 激波后参数
- *
- ∞ 无穷远处状态

上角标:

- * 等截面绝热摩擦管流或无摩擦换热管流中的极限状态; 又称临界状态
- T 等截面等温摩擦管流的参数
- *T 等截面等温摩擦管流的临界状态

目 录

基本符号	1
1. 定义和基本知识	1
1.1 流体、液体和气体	1
1.2 连续介质	2
1.3 热力学基本知识	3
1.4 流体力学基本知识	7
1.5 单位制	11
2. 基本方程和气动函数	13
2.1 控制容积法	13
2.2 质量守恒方程	15
2.3 动量守恒方程	17
2.4 能量守恒方程	21
2.5 热力学第二定律	26
2.6 音速与马赫数	27
2.7 滞止参数和气动函数	31
3. 一维定常变截面管流	49
3.1 基本方程	49
3.2 截面积变化对流动属性的影响	51
3.3 收缩喷管	55
3.4 缩放喷管	62
4. 膨胀波	71
4.1 气流绕外折转壁面的超音速流动——膨胀波的形成及其特点	71
4.2 膨胀波后气流参数的计算和普朗特——迈	

耶函数 $\nu(M)$ 数值表的用法	76
4.3 等熵微弱压缩波	84
4.4 膨胀波的反射和相交	87
5. 激波	98
5.1 正激波	99
5.2 斜激波	116
5.3 激波极线	123
5.4 激波的反射和相交	126
5.5 激波与边界层的相互影响	136
6. 一维定常绝热摩擦管流	146
6.1 芬诺线流动	146
6.2 芬诺流动的方程	149
6.3 等截面绝热摩擦管流的参数及计算	153
6.4 在喷管与等截面摩擦组合管中的流动	161
6.5 变截面绝热摩擦管流	171
7. 一维定常换热管流	178
7.1 等截面无摩擦换热管流的基本方程	178
7.2 瑞利线	186
7.3 等截面等温摩擦管流	196
7.4 变截面换热管流	202
8. 二维无粘流动及求解方法	213
8.1 多维流动的运动方程和用势函数的表达式	214
8.2 小扰动法	225
8.3 特征线法和二维流动平面上的特征线方程	230
8.4 速度平面上的特征线网图	239
8.5 特征线法在超音速喷管设计中的应用	250
9. 叶栅理论	257
9.1 叶栅的定义和几何参数	257
9.2 叶栅翼型的受力分析及气动特性	262

9.3	叶栅绕流计算的保角变换法	262
9.4	平面叶栅绕流的奇点法	289
附录 1	完全气体的等熵流动函数表($\gamma=1.4$)	299
附录 2	二维等熵超音速流动的特性线数表($\gamma=1.4$)	307
附录 3a	正激波表($\gamma=1.4$)	311
附录 3b	斜激波前后气流参数表($\gamma=1.4$)	317
附录 4	有摩擦的等截面绝热流动函数表($\gamma=1.4$)	331
附录 5	滞止温度变化的等截面无摩擦流动函数表 ($\gamma=1.4$)	338
附录 6	激波极线图	345
参考文献		346

1. 定义和基本知识

气体动力学是研究可压缩流体流动的一门学科，它属于流体力学的一个分支。在流动中密度发生很大变化的流体称为可压缩流体，气体就具有这种属性。气体动力学可用于解决火箭和导弹推进器、蒸汽轮机和燃气轮机、以及其他动力机械的一系列设计问题。在这些技术领域中，除了研究旋转式或往复式机械及设备的亚音速流动问题外，最近已发展到研究跨音速，超音速，高超音速和非定常的流动。气体动力学的主要任务之一是研究流体的力，质量和速度之间的关系。在详细分析可压缩流体流动之前，将有关流体力学和热力学的基本知识综述如下。

1.1 流体、液体和气体

流体是一种不能承受剪切力的物质，也就是说流体在剪切力作用下能连续地变形。固体在剪切力作用下发生一定的变形并保持着平衡。这说明了在剪切力作用下流体趋于流动而固体却维持其刚度。从分子观点来看，固体分子的吸引力很强而流体的就显得很弱。流体包括液体和气体。从日常经验中很容易看出它们的差别，如液体将占有一定大小的容积，而气体则充满给予的容积。所以气体分子的吸引力比液体的要小得多。

由于水或液体占有固定的容积，在外界压力作用下它的密度（单位体积的质量）将保持不变。实际上，在很大的压力作用下，液体的密度随压力也会发生很小的变化。在研究液体流动时可认为密度不变，这种类型的流动称为不可压缩流动。

对于气体来说，外界施加压力后其密度将发生很大的变化。

将密度发生很大变化的气体流动,称为可压缩流动。当然,在某些流动情况下,气体的密度不发生显著的变化,这种流动也可当作不可压缩流动来处理。通常情况下,气体的流动总是包含着密度的变化。

1.2 连续介质

气体是由大量分子所组成。在分析运动气体的属性时,如果考虑每个分子的运动,然后由统计方法可得到大量分子微观的平均值。这种方法非常烦琐和耗费时间,因而通常采用连续介质的

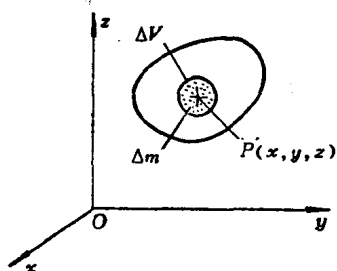


图1-1 连续介质的基元体积

模型来简化真实气体的微观结构。假设气体是连续介质,它充满某一给定体积,没有分子间隙也没有分子之间的运动。在气体占有的有限空间内,只有全部分子的平均效应,所以研究气体运动时,不必考虑大量分子的瞬时状态,而只要研究气体宏观状态的

物理量,如温度、压力和密度等。

例如应用连续介质的假设来定义气体的密度。在连续介质中取一个包围着 P 点的小容积 ΔV (见图1.1),其中全部分子的总质量为 Δm ,比值 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$ 表示气体的平均密度,当 ΔV 趋于一个很小的容积 V_{\min} ,其平均密度趋近于一个稳定的渐近值 ρ ,

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow V_{\min}} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

只要小容积 V_{\min} 内包含足够数量的分子,密度的定义就可表征流体的属性。如果 V_{\min} 太小,在 V_{\min} 内可能没有分子存在,那末密度也就没有意义了。因此在气流中不可说成在一点上的密度,而

必须认为密度是在具有大量分子的极小容积内的气体的属性。在流体动力学中,将这一小体积 V_{\min} 中的流体称为流体质点,所以连续介质中的点是指流体质点。连续介质本身就由无限多个连续分布的流体质点所组成。

依此类推,定义压力为施加于表面上每单位面积的法向作用力,于是

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow A_{\min}} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}, \quad (1.2)$$

式中: ΔF_n 为法向作用力; ΔA 为表面积; 而 A_{\min} 则为一无限小面积。同样,我们不能在一个点上定义压力,只有在一个很小的有限面积上,定义压力才是有意义的。

应用连续介质概念研究气体流动时,已经注意到讨论的长度和容积要比分子的尺寸和分子之间的距离要大得多。因此,采用连续介质假设的准则时,研究物体的特征长度必须大于分子的平均自由程。当然,采用连续介质的假设来分析气体流动,使问题大为简化。但在有些情况,譬如气流的密度非常低,这种假设就不再适用了,而必须分析分子的运动。研究这种气体的流动称为稀薄气体动力学,它已不属于本书讨论的范围。本书中把气体流动都假设成连续介质流动。

1.3 热力学基本知识

1.3.1 热力学第一定律

热力学第一定律是应用于热现象时的能量转换与守恒定律。它指出:“当热能与其他形式的能量进行转换时,能的总量保持恒定”。对任何系统,各项能量的数量关系式可表示为

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统贮存能量的变化},$$

$$Q - W = \Delta E, \quad (1.3)$$

式中: Q 表示系统在某过程中的吸热; W 表示系统对外所作的

功, ΔE 为系统总能量的变化, 它包括内能的变化 ΔU , 动能的变化 ΔE_k 和位能的变化 ΔE_p 。

1.3.2 气体的比热

单位物量的物质, 温度升高 1K(或 1°C) 所需的热量称为比热。不同加热过程中, 比热是不相同的。

定容比热表示定容过程的比热, 其定义式为

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\delta q}{\partial T} \right)_v, \quad (1.4)$$

它可以理解为在比容不变的条件下, 温度变化 1 K 时, 内能变化的数值。

而定压过程的比热称为定压比热, 其定义式为

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\delta q}{\partial T} \right)_p, \quad (1.5)$$

它表示了在压力不变的条件下, 温度变化 1 K 时, 焓变化的数值。

气体的比热值都随温度而改变的。

定压比热与定容比热的比值称为比热比 γ , 即

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}. \quad (1.6)$$

从气体分子运动理论可知, γ 与分子自由度有关,

$$\gamma = \frac{n+2}{n}$$

式中 n 为分子自由度。在很大温度范围内, 几种气体的 γ 值列于表 1.1。

表 1.1 气体的比热比

气 体	自由度 n	$\gamma=c_p/c_v$
氢、氧	3	1.67
空气	5	1.40
水蒸气、二氧化碳	6	1.33
乙烷	8	1.25

1.3.3 内能和焓

贮存于系统内部的能量称为内能，它是一个状态参数。如果在绝对零度时，内能取为零值，那末，1 kg 工质气体的内能为

$$u = c_v T. \quad (1.7)$$

当系统的质量为 m 时，系统的内能为 $U = mc_v T$ ，其中假设在温度 T 时，定容比热 c_v 保持为常数。

对可压缩流体，内能往往与 p/ρ 项同时出现，将它们合并并用一个新的物理量焓 h 来代表，则

$$h = u + \frac{p}{\rho}. \quad (1.8a)$$

对完全气体

$$\begin{aligned} h &= u + RT = (c_v + R)T, \\ h &= c_p T. \end{aligned} \quad (1.8b)$$

1.3.4 状态方程

系统的状态由某些热力参数确定，这些参数之间的关系式称为状态方程。其他一些热力学参数可由状态方程中已知参数来确定。由三个基本状态参数，即压力 p 、密度 ρ 和温度 T 构成的状态方程可表示为

$$f(p, \rho, T) = 0. \quad (1.9a)$$

理想气体的状态方程就是其中一例，其表达式为

$$p = \rho RT, \quad (1.9b)$$

式中 R 是气体常数，它由工质性质决定。对任何理想气体

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{M}}, \quad (1.10)$$

式中， \bar{R} 为通用气体常数， $\bar{R} = 8314.3 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{mol}\cdot\text{K})$ ； \bar{M} 为气体分子量，以空气为例， $\bar{M} = 28.966 \text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{mol})$ 。因此

$$R = \frac{8314.3}{28.966} = 287.04 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

此外, 气体常数还可表示成

$$R = c_p - c_v \quad (1.11a)$$

由式(1.6)和式(1.11a), 可得

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R, \quad (1.11b)$$

$$c_v = \frac{1}{\gamma - 1} R. \quad (1.11c)$$

1.3.5 热力学第二定律

研究可压缩流体流动还有两个很重要的热力学概念, 那就是可逆过程与状态参数熵。热力学中对可逆过程定义如下: 当热力系统完成某一过程后, 如果全过程逆行而能使系统及外界都回到原始状态而不留下变化, 该过程称为可逆过程。由定义可见, 可逆过程必须是准平衡过程, 变化的进展为无限缓慢, 同时在过程中不包含任何耗散效应。由于热力学是研究平衡状态的, 也只有在可逆过程中才能推导出过程的热力学方程。但实际的流动过程存在摩擦、温差传热, 突然膨胀, 气体混合等现象, 所以实际过程通常是不可逆的。应用可逆的假设会引起一定的近似性, 但它能使热力学方程简化。在很多情况下, 应用可逆的假设也能导致相当正确的结果。但我们必须记住, 可逆过程只是一个理想的情况。

根据热力学第二定律导出热力参数熵 s , 在可逆过程系统中

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; \quad (1.12)$$

在不可逆过程中

$$dS > \frac{\delta Q}{T}. \quad (1.13)$$

可见, 由热传导或过程的不可逆性会引起熵的增加。绝热过程中, 系统与外界没有热量传递, $\delta Q = 0$, 而熵可以增加或保持不变。如果过程是绝热和可逆的, 熵将不发生变化, 该过程称为等熵过程。

应用熵的定义式和热力学第一定律基本关系式

$$\delta Q = du + pd(1/\rho) = dh - dp/\rho$$

可以得出完全气体熵变化的关系式为

$$dS = \frac{c_v}{T} dT + \frac{p}{T} d(1/\rho) \quad (1.14a)$$

积分上式可得

$$S_2 - S_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad (1.14b)$$

$$S_2 - S_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln(\rho_1/\rho_2); \quad (1.14c)$$

$$S_2 - S_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln(\rho_1/\rho_2)。 \quad (1.14d)$$

1.4 流体力学基本知识

1.4.1 定常流动与非定常流动

在定常流动中,控制体内流体参数如压力、温度、速度等随时间均不发生变化,用数学式表示如下:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0。 \quad (1.15)$$

控制体中一个或几个流体参数随时间而变化的流动称为非定常流动。

1.4.2 粘性

流体粘性是指相邻两流体层之间发生相对滑移时产生切向阻力的性质。在牛顿流体中,流体的切应力与角变形之间是按线性关系变化的,如图 1.2 所示,单元 $ABCD$ 在单位时间内的角变形为

$$\frac{1}{t} \frac{dv}{dy} = \frac{dv}{dy}。$$

切应力与变形成比例