

➤ 高等学校应用型本科“十三五”规划教材

机 电
MECHATRONICS

计 算 机
COMPUTER

电 子
ELECTRONICS

工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

➤ 向 伟 编 著

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

向 伟 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是应用型本科“十三五”教改规划教材。“工程流体力学”是高等学校工程基础类课程。本书参考了国外工程应用型本科教材内容,并结合国内应用型本科教改要求而编写,内容全面,侧重基础和工程的实际应用。

全书共九章,主要包括流体的性质,流体静力学,流体运动的基本方程,量纲分析与相似理论,黏性流体的管内流动,明渠流动,黏性流体的绕流流动,孔口管嘴和缝隙的水力计算,气体动力学基础等内容,对工程流体力学基础知识及工程流体力学在工程上的应用进行了全面系统的介绍。

本书可作为能源动力工程、机械工程、城市建筑工程、环境工程、石油和化学工程、航空航天工程以及生物工程等专业的学习教材,也可作为从事与流体传动相关研究和应用的工程技术人员、教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/向伟编著. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017. 2

高等学校应用型本科“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4386-1

I. ①工… II. ①向… III. ①工程力学—流体力学 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 306654 号

策 划 戚文艳

责任编辑 张 玮

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 19.5

字 数 456千字

印 数 1~3000册

定 价 36.00元

ISBN 978-7-5606-4386-1/TB

XDUP 4678001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

随着工程学的发展,工程流体力学在能源动力工程、机械工程、建筑环境与能源应用工程、环境工程、石油和化学工程、航空航天工程以及生物工程等领域得到了广泛的应用与发展。

“工程流体力学”是高等学校工程基础类课程。本书面向高等学校的学生和现场的技术人员尽可能地深入浅出讲解相关内容,使读者在具备基础高等数学和物理学的知识后,就能阅读和正确理解本书的内容。

在本书的写作中,特别注重了以下几个方面:

(1) 本书统一使用 SI 国际单位制。书中的符号进行严格的规定,便于读者在学习中更加容易保持概念的一致性。关于压力和压强的说法,因工程上习称为压力,又由于流体在工程概念上是没有强度的,所以本书作为工程流体力学,使用的是压力概念。

(2) 流体流动是相当复杂的物理现象,除不得已情况外,均以一元流动理论为主来讲解。书中的楷体字部分设置稍微详细的说明,以帮助理解。

(3) 利用各种实验资料和实验数据解决工程上的一些实际问题,这种应用在第 3、5、6、7 章很明显,从而避免了繁琐的数学推导,使其计算结果很容易得到。

(4) 书中通过例题帮助读者理解重要的概念和定律,在各章末附有测试练习,以提高解决问题的能力。对理论性较强的内容,比如平面势流问题等,通过联系实际应用,加深读者的理解,提高读者的学习兴趣。

(5) 本书丰富了绕流的阻力和升力计算、浮体稳定性计算、局部阻力计算、明渠计算等内容,弥补了目前国内教材在该部分出现的短缺,为后续专业课的学习、技术开发和应用打下丰厚的基础。

编著者一直从事流体传动和工程流体力学课程教学与科研工作,具有丰富的教学和现场工作经验。在编写本书时,参考了国内外前辈许多贤人的著作和论文,并得到了专业同事的支持与帮助。

本书由重庆科技学院向伟编写完成,并绘制本书中的所有插图。

限于水平,本书的不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者 向伟

2016.9.29 于重庆科技学院

主要符号含义说明

工程流体力学涉及的内容很多,导致符号表示的内容繁多,为方便读者学习,尽量统一符号表示的同一含义,具体含义如下:

1. 英文字母

A	面积(m^2); 断面面积(m^2); 投影面积(m^2)
a	加速度(m/s^2)
B	宽度(m); 系数; 任意物理量
b	宽度(m)
C	系数; 常数
C	形心; 浮心
C_f	摩擦系数
C_l 、 C_d 、 C_m	二维机翼的升力、阻力、力矩系数
C_L 、 C_D 、 C_M	三维机翼的升力、阻力、力矩系数
C_p	压力系数
C_d	阻力系数
C_v	流速系数
C_q	流量系数
C_s	堰的流量系数
c	声速(m/s); 比热容; 翼弦弦长(m)
c_p	定压比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
c_v	定容比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
d	直径(m)
d	微分符号
d_h	水力直径
D	直径(m); 阻力(N); 压力中心
E	流体的能量(J); 材料的弹性模量
e	单位量流体的能量; 偏心距
F	作用力(N); 总压力(N); 浮力
f	单位质量作用力(N)
G	重力(N); 负载; 重心
g	重力加速度(m/s^2)
H	高度(m); 深度; 总水头; 扬程; 热力学中表示为焓(J)

h	高度(m); 水头; 能量损失(m); 比焓(J/kg)
h_w	水头损失
h_f	沿程损失
h_j	局部损失
I	惯性矩
i	坡度
$i、j、k$	直角坐标系三个正交单位矢量
K	流体体积模量; 系数;
K	绝对温度的单位
k	绝热指数; 其他系数; 比例系数
L	长度(m); 升力(N)
l	长度量(m); 混合长度
M	动量(kg · m/s); 偶极矩
M	浮体稳心; 射流中表示轴心速度的角标和极点
m	质量(kg); 明渠的平均水力深度(m); 系数; 个数
n	转速(r/min); 多变指数; 曼宁粗糙系数; 个数
n	平面法线方向单位
N	功率(kW); N_{sh} 轴功率
p	压力(Pa), 泛指相对压力(表压力), 在气态方程中指绝对压力; 在明渠巴生公式中, 指的是与壁面种类有关的系数
p_s	表面压力
p_t	全压(Pa); p_F 在风机中表示风机的全压
p_G	以体积比能表示的管网阻力比能(Pa)
p_v	真空度
p_{va}	饱和蒸汽压力
p_{∞}	无穷远处压力
Q	液体的体积流量(m^3/s); 热力学中表示热量(J)
ΔQ	泄漏量
Q_m	质量流量(kg/s)
Q_v	体积流量(m^3/s); 常用于气体方程中, 以示与表示热量的 Q 相区别
q	单位质量流体的热量(J/kg); 单位宽度流体的流量(m^2/s)
R	气体常数[J/(kg · K)]; 半径(m)
r	转; 半径
S	行程(m); 熵(J/K); 表面面积(m^2); 角标表示侧面、表面等意义
s	相对密度; 比熵[J/(kg · K)]; 流线(m); 明渠的湿周长; 射流的射程
T	周期; 绝对温度(K); 力矩(N · m), 力偶(N · m), 总切向力(N)
t	时间(s); 摄氏温度($^{\circ}C$), 节距
U	气体内能(J); 边界层层外速度
u	瞬时速度(m/s); 线速度(m/s); 牵连速度(m/s); 比内能(J/kg)

u'	速度脉动值; u'_x 、 u'_y 、 u'_z 分别表示在 x 、 y 、 z 三个方向速度的脉动值
u_*	壁面摩擦速度
u_o	壁面速度
u_θ	圆周向速度
u_r	圆径向速度
V	体积(m^3); 作角标时表示容积的
V_p	压力体
v	平均速度(m/s); 绝对速度(m/s)
W	功量(J); 宽度(m); W_v 表示容积功
W	瓦特(W)
w	相对速度(m/s); 单位质量的功(J/kg); w_{sh} 单位质量的轴功
Z	绝对高度(m)
z	高度(m); 比位能(m)

2. 希腊字母

α [alpha]	角度($^\circ$); 马赫锥; 动能修正因子
β [beta]	角度($^\circ$); 修正系数; 动量修正因子; 温度系数
Γ [gamma]	速度环量
δ [delta]	间隙; 调节开度; 层流底层厚度; 边界层的厚度; 质量流量亏损厚度
Δ [delta]	管壁的绝对粗糙度(mm)
ϵ [epsilon]	相对粗糙度; 收缩系数; 变形速度; 堰的侧向收缩系数
η [eta]	分布函数; 效率
θ [theta]	动量流量亏损厚度; 角度
λ [lambda]	线性尺寸比; 比例系数; 沿程阻力系数
γ [gamma]	重度(N/m^3); 角度
σ [sigma]	表面张力(N/m); 应力(N/m^2); 堰的淹没系数
τ [tau]	剪切应力(N/m^2); 内摩擦力(N/m^2)
τ_o	壁面切应力(N/m^2)
ρ [rou]	密度(kg/m^3)
μ [mu]	动力黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ν [nu]	运动黏度(m^2/s)
υ [upsilon]	比容(m^3/kg); 作角标时表示定容的
ζ [zeta]	局部阻力系数
ξ [xi]	阻力系数(含当量阻力系数的局部阻力系数)
φ [phi]	速度势函数
ψ [psi]	流函数
ω [omega]	角速度
$\mathcal{R}$ [Re]	普适气体常数
κ [kappa]	射流的紊流系数

3. 其他

∇	哈密尔顿算子
∇^2	拉普拉斯算子
Eu	欧拉数($=p/\rho v^2$)
Fr	弗汝德数($=v^2/gl$)
Re	雷诺数($=vl/\nu$)
Ma	马赫数($=v/c$)
We	韦伯数($=\rho l v^2/\sigma$)
Ar	阿基米德准数

4. 角标说明

cr	临界的
st	静止的；滞止的
.	点号在角标中，表示进一步说明角标的意思。例如： $p_{cr, st}$ 表示临界状态的滞止压力； $p_{st, 2}$ 表示断面 2 处的滞止压力

5. 字母说明

书中字母 v 的矢量形式为 $\mathbf{v}$ 。

目 录

第 1 章 流体的性质	1	思考题	50
1.1 流体的基本概念	1	习题	50
1.2 密度、比容和饱和蒸汽压力	2		
1.3 流体的压缩性	5	第 3 章 流体运动的基本方程	55
1.4 流体的黏性	6	3.1 描述流体运动的基本概念	55
1.5 液体的表面张力	11	3.1.1 描述流体运动的方法	55
1.6 作用在流体上的力	13	3.1.2 描述流场的基本概念	56
1.7 阅读材料: 工程流体力学学习导论	14	3.2 连续性方程	62
思考题	17	3.2.1 一元定常流动的连续性方程	62
习题	17	3.2.2 空间流动的连续性方程	65
		3.3 理想流体的运动微分方程	66
第 2 章 流体静力学	19	3.3.1 欧拉运动方程	66
2.1 流体静压力及其特性	19	3.3.2 理想流体的伯努利方程	69
2.2 静止流体平衡方程	21	3.3.3 伯努利方程的意义	70
2.2.1 流体平衡微分方程式的建立	21	3.4 总流的伯努利方程及其应用	70
2.2.2 等压面	22	3.4.1 总流的伯努利方程	70
2.2.3 静力学基本方程式	22	3.4.2 伯努利方程的应用	74
2.2.4 静力学基本方程式的意义	24	3.4.3 水力坡度与水头线	80
2.3 流体静力学基本公式及其应用	24	3.5 伯努利方程的扩展	82
2.3.1 流体静力学基本公式	25	3.5.1 重力、离心力联合场的 伯努利方程	82
2.3.2 流体静压力的表示方法和 计量单位	26	3.5.2 分流量或合流量的伯努利方程	84
2.3.3 液柱式测压计	27	3.5.3 过流断面间有能量的输入和 输出的伯努利方程	85
2.4 其他质量力作用下的流体平衡	29	3.6 动量和动量矩方程	87
2.4.1 等加速水平运动容器中流体的 相对平衡	29	3.6.1 定常流动量方程	88
2.4.2 等角速旋转容器中流体的 相对平衡	30	3.6.2 动量矩方程及应用	93
2.4.3 工程应用	33	3.7 流体微团运动分析	95
2.5 平衡液体对壁面的作用力	35	3.7.1 流体微团运动分解	95
2.5.1 作用在平面上液体的总压力	35	3.7.2 流体微团变形和旋转的特征量	95
2.5.2 作用在曲面上液体的总压力	40	3.8 流体的有旋流动	98
2.5.3 压力体	42	3.8.1 强制涡流	99
2.6 浮力与浮体的稳定性	45	3.8.2 自由涡流	100
2.6.1 浮力	46	3.8.3 组合涡流	101
2.6.2 浮体的稳定性	48	3.8.4 放射流和自由涡流的组合	102
		3.9 黏性流体的运动微分方程	103

3.9.1 纳维-斯托克斯方程的建立	103	5.7 气穴和汽蚀	174
3.9.2 在简单边界条件下纳维-斯托克斯 方程的精确解	106	5.8 有压管中的水击现象	176
3.10 欧拉运动方程与平面势流	109	5.9 管路的流体动力	180
3.10.1 空间欧拉运动方程	109	思考题	181
3.10.2 平面势流模型	110	习题	182
3.10.3 平面势流的应用	116		
思考题	117	第6章 明渠流动	186
习题	117	6.1 明渠	186
第4章 量纲分析与相似理论	123	6.2 均匀流的平均速度公式	188
4.1 量纲分析	123	6.3 缓流、急流和临界水深	191
4.2 相似理论	127	6.4 水跃和水跌	193
4.3 模型实验	131	6.4.1 水跃	193
思考题	132	6.4.2 水跃	196
习题	132	6.5 堰流	197
		思考题	199
		习题	199
第5章 黏性流体的管内流动	133	第7章 黏性流体的绕流流动	201
5.1 流体流动的两种流动状态	133	7.1 绕流的阻力和升力	201
5.2 圆管中的层流流动	136	7.2 边界层	203
5.3 圆管中的紊流流动	139	7.2.1 边界层分析	203
5.3.1 紊流的产生和脉动性	139	7.2.2 边界层的分离和压力阻力的 产生	205
5.3.2 紊流附加应力和混合长度理论 ..	140	7.3 平板的摩擦阻力	207
5.3.3 圆管紊流的速度分布和 紊流的结构	143	7.3.1 层流边界层的摩擦阻力计算	208
5.3.4 紊流速度分布的对数定律	144	7.3.2 紊流边界层的摩擦阻力计算	210
5.3.5 紊流速度分布的指数定律	146	7.4 压力阻力	213
5.4 管路紊流的沿程水头损失	146	7.5 翼型及叶栅	218
5.4.1 尼古拉兹实验	147	* 7.6 翼型绕流中环量和升力的产生	222
5.4.2 莫迪图	149	7.7 射流	224
5.4.3 非圆形截面管流动沿程 水头损失	152	7.7.1 射流的分类和形成	224
5.5 局部水头损失	153	7.7.2 射流的特征和计算	225
5.5.1 断面面积急速变化的水头损失	153	7.7.3 温差(浓差)射流	229
5.5.2 断面渐扩管的水头损失	155	思考题	229
5.5.3 弯管的水头损失	157	习题	229
5.5.4 阀门的水头损失	159		
5.5.5 分支管、合流管的水头损失	161	第8章 孔口、管嘴和缝隙的水力计算 ..	234
5.6 管路的水力计算	163	8.1 孔口出流	234
5.6.1 管路工程计算简介	163	8.1.1 定常水头下薄壁圆形小孔的 稳定自由出流	234
5.6.2 简单长管的水力计算	165	8.1.2 定常水头下薄壁圆形小孔的 稳定淹没出流	236
5.6.3 复杂管路的水力计算	167		
5.6.4 短管的水力计算	171		

8.1.3 变水头孔口出流	237	9.5.1 滞止状态参数	265
8.2 管嘴出流	238	9.5.2 极限速度和滞止声速	267
8.2.1 圆柱形管嘴定常出流	238	9.5.3 临界状态参数	267
8.2.2 其他形状管嘴出流	239	9.6 气流参数与通道面积的关系	268
8.3 缝隙流动	241	9.6.1 截面积的变化对气流参数的 影响	268
8.3.1 平行平板间的缝隙流动	241	9.6.2 收缩形喷管	270
8.3.2 圆环的缝隙流动	244	9.6.3 缩扩形喷管——拉伐尔喷管	273
8.3.3 平行圆盘端面缝隙流动	245	9.7 激波简介	274
思考题	247	9.8 等截面摩擦管流	276
习题	247	9.9 等截面换热管流	279
第9章 气体动力学基础	249	思考题	283
9.1 气体的状态参数	249	习题	284
9.2 一元定常可压缩流动的基本方程	251	附录 A 压力的测量	285
9.2.1 连续性方程	251	附录 B 流速和流量的测量	288
9.2.2 运动方程	251	附录 C 工程流体力学常用量及 单位换算表	293
9.2.3 能量方程	251	习题答案	295
9.3 完全气体的过程方程	255	参考文献	300
9.4 声速和马赫数	262		
9.4.1 声速	262		
9.4.2 马赫数	263		
9.4.3 弱扰动在气流中的传播	264		
9.5 一元定常等熵气流参数	265		

第1章 流体的性质

流体指可以流动的物质,包括气体和液体。与固体相比,流体分子间的引力较小,分子运动剧烈,分子排列松散,这就决定了流体不能保持一定的形状,具有较大的流动性。在一定的剪切力作用下,刚体不产生任何变形;弹性体的变形与作用力的大小成正比,并且在作用力消失后能够恢复原来的形状;塑性体与弹性体类似,只是在作用力消失后只能部分地恢复原来的形状。而流体则不同,无论在多么小的剪切力作用下其变形都将持续下去,直至剪切力消失。流体的这种持续的剪切变形称为流动。因此,流体与固体最显著的差别就是具有流动性。

气体(gas)和液体(liquid)都属于流体(fluid),除了都具有流动性之外,还有以下两点差别:首先是气体具有很大的压缩性,而液体的压缩性非常小;其次是容器内的气体将充满整个容器,而液体则有可能存在自由液面。

1.1 流体的基本概念

工程流体力学(engineering fluid mechanics)是力学的一个分支,它主要研究流体在静止和运动时所遵循的基本规律,以及流体与固体间的相互作用,用来解决工程实际问题。工程流体力学的研究内容包含流体静力学、流体运动学和流体动力学三部分。

同物理学等其他自然科学学科的研究方法一样,流体力学的研究方法包括理论方法和实验方法。理论方法就是根据物理模型和物理定律建立描写流体运动规律的封闭方程组以及相应的初始条件和边界条件,运用数学方法准确或近似地求解流场,揭示流动规律;实验方法则是运用模型实验理论,设计实验装置直接观测流动现象,测量流体的流动参数并加以分析和整理,然后从中得到流动规律。

在流体力学学科体系中,根据研究方法的不同,流体力学可分为理论流体力学、工程流体力学和水力学三个分支。理论流体力学侧重于运用数学方法进行理论研究;水力学侧重于运用物理和实验方法进行实用研究;而工程流体力学则趋向于前面两种方法的结合,对工程实际涉及的流体力学问题进行研究。

任何实际的流体都是由大量微小的分子构成的,而且每个分子都在不断地做无规则的热运动。但是,流体力学的任务是研究流体的宏观运动规律。所以,在流体力学领域里,一般不考虑流体的微观结构,而是采用一种简化的模型来代替流体的真实微观结构。按照这种假设,流体充满着一个空间时是不留任何空隙的,即把流体看做是连续介质。

由连续介质假设所带来的最大简化是:我们不必研究大量分子的瞬间运动状态,而只要研究描述流体宏观状态的物理量(如密度、速度、压力等)就行了。在连续介质中,可以把这些物理量看做是空间坐标和时间的连续函数。因而在处理流体力学问题时,有了连续介质假设,就可以把一个本来是大量的离散分子或原子的运动问题近似为连续充满整个空间的流体质点的运动问题。而且每个空间点和每个时刻都有确定的物理量,它们都是空间

坐标和时间的连续函数，从而可以利用数学分析中连续函数的理论分析流体的流动。这一假设在绝大多数情况下都是适用的，只有对稀薄气体，这一假设不再适用，而必须将其看做是不连续的介质。

在连续介质假设的条件下，流体质点在微观上充分大，在宏观上充分小，是不具有变形和旋转等线性尺度效应的分子团。流体微团是由大量流体质点组成的，具有线性尺度效应的微小流体团。流体是大量流体微团的集合，流体微团又是大量流体质点的集合。流体微团具有变形和旋转等尺度效应，流体质点则没有。

1.2 密度、比容和饱和蒸汽压力

单位体积流体所具有的质量(mass)称为密度(density)，用 ρ 表示。对于均质流体，如其体积为 V ，质量为 m ，则

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1a}$$

对非均质流体，某一点的密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{1-1b}$$

此时密度是空间位置坐标和时间的函数，即 $\rho=\rho(x, y, z, t)$ 。

国际单位制表示密度的单位是 kg/m^3 。

在一个标准大气压(101.3 kPa)下，干空气在 15℃时的密度为

$$\rho=1.226 \text{ kg/m}^3$$

纯水在 4℃时的密度为

$$\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$$

表 1-1 给出了标准大气压力下水的物理性质。

表 1-1 101.3 kPa 水的物理性质

温度 /℃	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	运动黏度 $\nu/(\text{mm}^2/\text{s})$	表面张力 $\sigma/(\text{N/m})$	饱和蒸汽压力 p_{va}/kPa 绝对	体积弹性模量 K/kPa
0	999.8	1.792	0.0756	0.611	1.98×10^6
4	1000.0	1.520	0.0749	0.872	2.05×10^6
10	999.7	1.307	0.0742	1.230	2.10×10^6
15	999.1	1.139	0.0735	1.710	2.15×10^6
20	998.2	1.004	0.0728	2.34	2.17×10^6
25	997.0	0.893	0.0720	3.17	2.22×10^6
30	995.7	0.801	0.0712	4.24	2.25×10^6
40	992.2	0.658	0.0696	7.38	2.28×10^6
50	988.0	0.554	0.0679	12.33	2.29×10^6
60	983.2	0.475	0.0662	19.92	2.28×10^6
70	977.8	0.413	0.0644	31.16	2.25×10^6
80	971.8	0.365	0.0626	47.34	2.20×10^6
90	965.3	0.326	0.0608	70.10	2.14×10^6
100	958.4	0.295	0.0589	101.33	2.07×10^6

流体的相对密度是指其密度 ρ 与标准大气压下 4°C 的纯水的密度 ρ_w 比值, 又称比重 (specific weight), 用 s 表示, 即

$$s = \frac{\rho}{\rho_w} \tag{1-2}$$

相对密度是一个无量纲量, 例如, 在标准大气压下, 0°C 的水银的相对密度为 13.6, 因此, 水银的密度 $\rho = s\rho_w = 13.6 \times 10^3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ 。

常见液体的相对密度见表 1-2。

表 1-2 常见液体的相对密度

液体	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对密度	液体	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对密度
蒸馏水	4	1.00	航空汽油	15	0.65
海水	4	1.02~1.03	轻柴油	15	0.83
重质原油	15	0.92~0.93	润滑油	15	0.89~0.92
中质原油	15	0.85~0.90	重油	15	0.89~0.94
轻质原油	15	0.86~0.88	沥青	15	0.93~0.95
煤油	15	0.79~0.82	甘油	0	1.26
航空煤油	15	0.78	水银	0	13.6
普通汽油	15	0.7~0.75	酒精	15	0.79~0.80

在气体流体力学中, 经常使用比容 (specific volume) 这一物理量。流体的比容是指单位质量的流体所占有的体积, 用希腊字母 v 来表示, 它与密度的关系为

$$v = \frac{1}{\rho} \text{ (m}^3\text{/kg)} \tag{1-3}$$

气体是容易被压缩的流体, 随着压力和温度的变化, 其体积显著变化。气体分子只有质量没有体积, 分子之间完全没有作用力的气体称为完全气体 (perfect gas)。所有远离液体状态的常用气体在很大的常用温度和压力范围内, 十分接近完全气体。因此, 空气、燃气、烟气等常用气体在常用的温度和压力范围内均可看做是完全气体。完全气体满足气体状态方程 (equation of state), 即

$$pv = RT, \quad \frac{p}{\rho} = RT \tag{1-4}$$

式中, p 是绝对压力 (absolute pressure), R 是气体常数 (gas constant), T 是绝对温度 (absolute temperature)。 R 的值与气体的种类有关, 如表 1-3 所示。压力和温度相同的两种气体, 它们的密度和气体常数分别为 ρ_1 、 ρ_2 和 R_1 、 R_2 , 则 $p/\rho_1 = R_1/T$, $p/\rho_2 = R_2/T$, 将两式相除, 则

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{R_1}{R_2}$$

上式称为阿伏加德罗定律 (Avogadro's principle) (根据阿伏加德罗定律, 同样压力、温度的气体, 单位体积中含有的分子数是相同的)。

以上两种气体的密度 ρ_1 、 ρ_2 与各自的分子量 m_1 、 m_2 成正比, 即 $\rho_1/\rho_2 = m_1/m_2$, 则

$$m_1 R_1 = m_2 R_2$$

上式表明, 分子量 m 与 R 的乘积, 对完全气体是一个定值, 称为普适气体常数 (universal gas constant), 用 $\mathscr{R}$ 表示。

$$\mathcal{R} = mR = 8313 \text{ J/(kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K)} \tag{1-5}$$

完全气体温度一定时，由式(1-4)知， $p\nu$ 一定或 p/ρ 一定，压力随密度变化，此时为等温变化(isothermal change)，也称玻意耳定律(Boyle's law)。

表 1-3 101.3 kPa、20℃ 时各气体的性质

气 体	分子符号	分子量 m	气体常数 R J/(kg · K)	绝热指数 $k=c_p/c_v$
干空气		28.96	287	1.40
氧气	O ₂	32.00	260	1.40
氮气	N ₂	28.00	296	1.40
二氧化碳	CO ₂	44.00	189	1.30
一氧化碳	CO	28.01	297	1.40
氢气	H ₂	2.02	4124	1.41
氦气	He	4.00	2077	1.67
甲烷	CH ₄	16.04	518	1.31
水蒸气(100℃，标准气压)	H ₂ O	18.02	462	1.33

气体在压缩或膨胀过程中，与周围环境无热量交换。温度在膨胀或压缩过程中不是恒定的，可逆压缩时温度升高，膨胀时温度降低，称为等熵变化(isentropic change)或可逆绝热变化(reversible adiabatic change)，即

$$p\nu^k = \text{常数}, \frac{p}{\rho^k} = \text{常数} \tag{1-6}$$

式中， k 是定压比热 c_p 和定容比热 c_v 之比，称为绝热指数。O₂、N₂ 和空气，它们的 $k=1.4$ 。

【例 1-1】 求温度 100℃，标准大气压($p=101.3 \text{ kPa}$)时，二氧化碳(CO₂)的密度和比容。

解 碳(C)的原子量为 12，氧(O)的原子量为 16，则二氧化碳(CO₂)的分子量为 44 mol。由式(1-5)得其气体常数 R 为

$$R = \frac{\mathcal{R}}{m} = \frac{8313}{44} = 189 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$$

查表 1-3 可知，二氧化碳完全气体的气体常数与计算结果是一致的。由式(1-4)知，密度为

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{101.3 \times 10^3}{189} = 1.44 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

由式(1-3)知，比容为

$$\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1.44} = 0.694 \text{ (m}^3\text{/kg)}$$

液体的汽化是指液体由液态转化为汽态的过程。液体的汽化与温度、压力有一定的关系。在一定压力下，温度升高到一定数值时，液体会开始汽化，或在一定温度下，压力降低到一定数值时，液体也会汽化。例如在一个大气压作用下，水在 100℃时就开始汽化。若水温为 20℃，压力降低到 0.24 个大气压时，水也会汽化。在一定的温度下，液体开始汽化的临界压力，称为该温度下液体的饱和蒸汽压力。水在不同水温度下的饱和蒸汽压力见表 1-4。

表 1-4 不同水温时的饱和蒸汽压力 $\left(H_{va} = \frac{p_{va}}{\rho g}\right)$

水温/℃	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
饱和蒸汽压力/ mH ₂ O	0.06	0.09	0.12	0.24	0.43	0.75	1.23	2.02	3.17	4.82	7.14	10.33

当液体某处的压力低于饱和蒸汽压力时，液体将发生汽化。

注：水的饱和蒸汽压力与温度的关系可用安托万经验公式确定，即

$$\lg p[\text{mmHg}] = 8.02754 - \frac{1705.616}{231.405 + t}$$

式中， t 为温度(℃)；水在 100℃ 时，饱和蒸汽压力为 101.3 kPa，在 20℃ 时，饱和蒸汽压力为 2.3 kPa。

1.3 流体的压缩性

气体压力变化很容易使其体积也发生变化；而对液体，尽管压力改变相当大，它的体积变化却很小。因此，通常将液体看成是不可压缩的流体或非压缩性流体(incompressible fluid)时，其误差非常小。但是，当液体压力的变化比较剧烈时，如水锤作用(water hammering，5.8 节介绍)，此时，液体的压缩性是必须考虑的。

如图 1-1 所示，在某一温度下，体积为 V 的流体在压力微小变量 Δp 的作用下，流体体积减少，减少量为 $-\Delta V$ (体积增加为正)。单位体积的减少量 $(-\Delta V/V)$ 与压力变化量 Δp 之比，称为流体的压缩率(compressibility)，用符号 β 表示，即

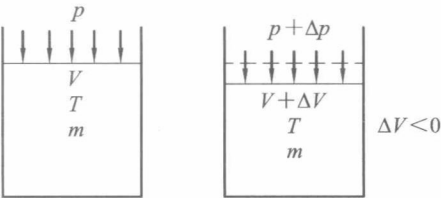


图 1-1 流体的压缩

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} = -\frac{1}{v} \frac{\Delta v}{\Delta p} \tag{1-7a}$$

或
$$\beta = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \left(-\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}\right) = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \tag{1-7b}$$

式(1-7)中， β 的单位与压力 p 的倒数相同，即为 (m^2/N) 或 $(1/\text{Pa})$ 。

表 1-5 列出各种液体在不同压力 p 作用下的 β 值。从该表中看出，液体的压缩率 β 非常小，所以液体在压力作用下体积的变化常常被忽略。但液体与固体相比，其压缩率是很大的，例如，水的压缩率是低碳钢的 80~100 倍。

表 1-5 各种液体的压缩率

液体	温度/℃	压力/kPa	$\beta/(\text{m}^2/\text{N})$
海水	10	$101.3 \sim 1.5 \times 10^4$	4.5×10^{-10}
5%食盐水	25	$101.3 \sim 4.9 \times 10^4$	3.8×10^{-10}
水银	20	$101.3 \sim 9.8 \times 10^3$	0.4×10^{-10}
甘油	14.8	$101.3 \sim 9.8 \times 10^2$	2.3×10^{-10}
橄榄油	20	$101.3 \sim 9.8 \times 10^2$	6.1×10^{-10}

压缩率的物理意义是：在一定温度下，变化单位压力所引起的体积相对变化率。因为压力 p 的变化与体积 V 或比容 v 的变化相反，为了保证体积压缩系数为正值，所以上式中要加负号。 β 值越大，流体的压缩性越大。工程上常用流体的压缩率的倒数来表征流体的压缩性，称为流体的体积模量(bulk modulus)，用 K 表示，单位为 Pa，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} = -v \frac{dp}{dv} \quad (1-8)$$

K 越大，流体的压缩性越小。

水的体积弹性模量 K ，随压力增大而单调增加，在温度约 50°C 的时候最大，温度再增高，其值会降低。表 1-1 表示了水的 K 值。

【例 1-2】 温度为 10°C ，体积为 1 m^3 的海水，当压力增加了 7 MPa 时，此时海水体积为多少？

解 查表 1-5 知， 10°C 时海水的压缩率 $\beta = 4.5 \times 10^{-5}$ ，由式(1-7)得海水的体积增加量 ΔV 为

$$\Delta V = -\beta V \Delta p = -4.5 \times 10^{-10} \times 1 \times 7 \times 10^6 = 0.003\ 15(\text{m}^3)$$

海水被压缩后的体积为

$$V' = V + \Delta V = 1 - 0.003\ 15 = 0.997(\text{m}^3)$$

1.4 流体的黏性

流体所具有的阻碍流体流动，即阻碍流体质点间相对运动的性质称为黏滞性，简称黏性。对液体来讲，黏性主要是由液体分子之间的引力引起的；对气体来讲，黏性是由气体分子的热运动引起的。

当流体中存在层与层之间的相对运动时，快层对慢层施加一个拖动力使它加速，同时慢层对快层也施加一个阻力，拖动力和阻力构成一对作用力和反作用力，这就是黏性的表现。这一对大小相等、方向相反的力称为流体的内摩擦力或黏性力。黏性力没有必要区分正负，流体在流动过程中要克服黏性力做功而消耗掉自身的能量。

牛顿经过大量的实验研究，于 1686 年提出了确定流体黏性力的“牛顿内摩擦定律”。设两块相距很近的平板，平板的尺寸很大，因此平板两端的影响可以忽略不计。平板之间充满流体，如图 1-2 所示，下平板固定不动，上平板在拉力 F 的作用下以匀速 u_0 运动，与平板接触的流体附着于平板的表面，带动两板之间的流体作相对运动，使流体内部流层之间出现成对的切向力，称为内摩擦力。

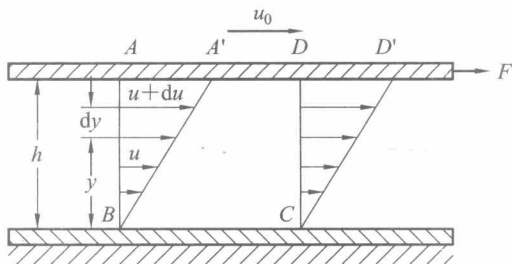


图 1-2 平行板间的黏性流体流动

在平板间距离 h 和速度 u_0 不大的情况下，两板之间流体的速度呈线性分布。图 1-2 中 $ABCD$ 流体的剪切变形，经过单位时间后，变形为 $A'B'CD'$ 。

实验研究表明，运动平板所受到的阻力与其运动速度、面积成正比，与两平板的间距