

高等学校教材

# 流体力学及应用

郭荣良 郭清南 祝世兴 主编



机械工业出版社

高等学校教材

# 流体力学及应用

郭荣良 郭清南 祝世兴 主编



机械工业出版社

本书是根据高等学校农业工程及机械制造等专业教学大纲而编写的。主要内容包括经典流体力学理论、旋涡流动理论及可压缩一元流基本理论和实际应用技术，具有一定的深度和广度。全书共分九章，前六章为流体力学，后三章以流体机械、泵和风机为重点，对其工作原理、工作参数的计算及选型配套等作了较为深入的阐述。

本书适用于高等学校40~65学时流体力学课程教学，也可以供化工、动力、冶金、锅炉、内燃机、农业机械化等专业技术人员自学参考。

12360  
12

### 图书在版编目(CIP)数据

流体力学及应用/郭荣良等主编。—北京：机械工业出版社，  
1996  
高等学校教材  
ISBN 7-111-05025-8

I. 流… I. 郭… II. 流体力学-高等学校-教材 N. 0  
35

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第21563号

出版人：马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)  
责任编辑：肖省吾 版式设计：王颖 责任校对：姚培新  
封面设计：郭景云 责任印制：王国光  
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1996年5月第1版第1次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·16印张·387千字  
0 001—4 000册  
定价：20.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

## 前 言

近年来,我国缺乏大专院校少学时用的流体力学教材,虽然在1982年由原农业机械部、农业部和农垦部联合组织编写了《水力学及水力机械》教材,1990年又由全国十八所高等院校联合编写了《流体力学及流体机械》教材,但其印数少,内容侧重于不可压缩流体理论,适应范围较窄,不能满足有关专业教学的需要。为此,全国近二十所高等院校于1994年8月在北京召开教材研讨会议,决定联合编写《流体力学及应用》教材,并商订了编写大纲,进行了编写工作分工。

本书内容包括经典流体力学理论、旋涡流动理论、可压缩一元流基本理论和实际应用技术。全书分为九章,由郭荣良、郭清南、祝世兴、杜金生主编。具体分工为:郭荣良编写第一、二、三章,祝世兴编写第四、五章,杜金生编写第六章,郭清南编写第七、八、九章。参编人员有张俊明、王琪、崔永汉、许海洪、周涛与刘建秀。审稿为许炳华。

本书适用于高等学校40~65学时流体力学课程教学,也可供有关专业技术人员自学参考。

本书在编写和出版过程中,得到有关学校领导的关心、支持,以及机械工业出版社的大力帮助,在此谨致谢意。

由于编者业务水平及编写条件限制,书中难免有遗漏和错误之处,企望读者批评指正。

编者

1995年5月

# 符号说明

## 一、希腊字母

字母	意义 (单位)
$\alpha$	动能修正系数; 角度
$\beta$	动量修正系数; 角度; 膨胀或压缩性系数
$\gamma$	重度(N/m <sup>3</sup> ); 角度
$\delta$	附面层厚度; 液膜厚度
$\epsilon$	法向应变率; 微小距离; 空隙率; 相对(质量)密度
$\zeta$	局部阻力系数
$\eta$	效率系数
$\theta$	圆柱或球坐标纬度(°); 切变速度(°/s)
$\lambda$	沿程阻力系数; 摩擦阻力系数
$\mu$	动力粘度(Pa·s)
$\nu$	运动粘度(m <sup>2</sup> /s); 比容(m <sup>3</sup> /kg)
$\rho$	密度(kg/m <sup>3</sup> , kg/cm <sup>3</sup> ); 曲率
$\pi$	圆周率; 角度
$\sigma$	法向应力(N/m <sup>2</sup> , kN/m <sup>2</sup> ); 表面张力(N/m)
$\tau$	切应力、粘性阻力(N/m <sup>2</sup> , kN/m <sup>2</sup> )
$\varphi$	角度; 速度系数
$\omega$	角速度; 旋转速度; 速度势
$\Phi$	函数、势函数
$\psi$	流函数
$\Gamma$	环量(m <sup>2</sup> /s)
$\Delta$	绝对粗糙度(mm, m)
$\Theta$	$\theta$ 方向单位质量体积力(N/kg)
$\Omega$	涡量, 旋转强度

## 二、拉丁大写字母

字母	意义 (单位)
A	面积、有效截面积(m <sup>2</sup> , cm <sup>2</sup> )
B	截面宽(m, cm)
C	常数; 有效截面面积的重心
D	管道直径(m, cm, mm)
E	弹性模量(Pa); 储存能量(J); 函数; 内能
F	作用力(N, kN); 函数
G	重量(N, kN)
H	压头(m, cm); 位置高度(m, cm)
J	比压降(N/m <sup>2</sup> /kgm)
K	流体弹性模量(N/m <sup>2</sup> ); 系数
L	流道或流程长度(m); 混合尺度; 单位质量所作的功
M	力偶矩、转矩
P	总压力(N, kN); 功率(W, kW)

(续)

字母	意义 (单位)
Q	流量(kg/s, kN/s, m <sup>3</sup> /s或l/s)
R	有效截面上的水力半径(m); 圆形半径(m, cm)
S	距离(m, cm)
T	绝对温度(K); 时间
U	势函数; 单位质量的质量力(m/s <sup>2</sup> , cm/s <sup>2</sup> )
V	体积, 容积(m <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup> )
X	x方向单位质量的体积力
Y	y方向单位质量的体积力
Z	z方向单位质量的体积力

## 三、拉丁小写字母

字母	意义 (单位)
a	加速度(m/s <sup>2</sup> , cm/s <sup>2</sup> ); 声速(m/s)
c	比热容(J/kg·K)
d	管道直径(m, cm, mm)
e	单位质量储存能量(J/kg); 输入或输出比能(m)
f	阻力系数; 频率(1/s); 函数
g	重力加速度(m/s <sup>2</sup> )
h	高度(m, cm, mm); 压力水头(m, cm, mm)
i	在x方向的向量; 焓
j	在y方向的向量; 单位质量的热量(J/kg)
k	在z方向的向量; 比热比(绝热指数)
l	长度; 管道长(m, cm)
m	质量(kg, g); 质量流率(kg/s)
n	转动频率; 比转速; 法线方向; 多变指数
o	坐标原点
p	压力、压强(N/cm <sup>2</sup> , kN/m <sup>2</sup> )
q	单位流程上泄流量(m <sup>2</sup> /s, cm <sup>2</sup> /s, l/s, kg/s, N/s, kN/s)
r	半径, 旋转半径(m, cm, mm); 圆柱坐标径距(m, cm, mm)
s	弧长; 距离(m, cm, mm)
t	时间(s); 摄氏温度(°C)
v	瞬时速度(m/s, cm/s)
$\bar{v}$	时均速度、平均流速(m/s, cm/s)
v'	质点脉动速度(cm/s, mm/s)
v <sub>0</sub>	滞止速度
v <sub>a</sub>	绝对速度(m/s, cm/s)
v <sub>e</sub>	牵连速度(cm/s, mm/s)
v <sub>m</sub>	相对速度(m/s, cm/s)

(续)

字母	意义 (单位)
$v_{\omega}$	环向(圆周)速度(m/s, cm/s)
$v_k$	临界速度(cm/s, mm/s)
$w$	总质量力

(续)

字母	意义 (单位)
$x$	$x$ 轴坐标
$y$	$y$ 轴坐标
$z$	$z$ 轴坐标: 铅直距离、高度(m)

# 目 录

前言

符号说明

第一章 绪论	1
§1-1 流体及其连续介质假定	1
§1-2 流体的主要物理性质	2
§1-3 流体的粘性	11
§1-4 作用在流体上的力	17
习题	20
第二章 流体静力学	21
§2-1 流体静压力及其特性	21
§2-2 流体平衡微分方程式	24
§2-3 流体静力学基本方程	27
§2-4 压力名称、单位及测压计	30
§2-5 流体静压力图示法与静压奇象	36
§2-6 帕斯卡原理	37
§2-7 作用在平面及曲面上流体的总静压力	38
§2-8 流体的浮力与潜浮原理	46
§2-9 流体的相对平衡	49
§2-10 流体静力学原理应用	54
习题	56
第三章 流体动力学	60
§3-1 流体运动的描述	60
§3-2 连续方程式	70
§3-3 理想流体的运动方程式	74
§3-4 流体的伯努利方程式	78
§3-5 稳定流的动量方程	88
§3-6 实际流体运动的微分方程	94
§3-7 流体微团运动的分析	100
§3-8 平面圆形旋涡	105
习题	110
第四章 流动阻力与损失计算	115
§4-1 层流、紊流和雷诺判据	115
§4-2 管道中的层流	119
§4-3 间隙中的层流	125
§4-4 圆管中的紊流运动	131
§4-5 圆管中的沿程阻力	134
§4-6 局部损失计算	140
§4-7 水头损失的叠加原则	144
§4-8 减小阻力的措施	145

习题	147
第五章 有压管路与孔口、管嘴出流	150
§5-1 管路水力计算概述	150
§5-2 短管与长管水力计算	151
§5-3 串联与并联管路水力计算	153
§5-4 孔口出流	156
§5-5 管嘴出流	161
§5-6 有压管路中的水击	164
习题	167
第六章 理想可压缩流体的基本理论	170
§6-1 一元恒定等熵流动的基本方程	170
§6-2 声速和马赫数	172
§6-3 一元恒定等熵流体的基本特性	175
§6-4 一元恒定等熵变截面气流	180
§6-5 气体在等截面管中绝热有摩擦的流动	186
习题	190
第七章 流体机械概述	191
§7-1 泵与风机的构造和工作过程	191
§7-2 泵与风机的性能参数	203
第八章 叶片式泵与风机的理论及运用	207
§8-1 叶片式泵与风机的叶轮理论	207
§8-2 泵与风机的损失及效率	212
§8-3 叶片式泵与风机的性能曲线和运行工作点	213
§8-4 叶片式泵与风机的相似定律和比转数	217
§8-5 泵的汽蚀	222
§8-6 泵与风机的性能测试	226
§8-7 叶片式泵与风机的工况调节	229
§8-8 泵与风机的选型、配套与使用	235
习题	236
第九章 节水型灌溉机具简介	238
§9-1 喷灌机具	238
§9-2 滴灌设备	241
参考文献	247

# 第一章 绪 论

流体是自然界中除固体以外存在的一种物质形式。流体力学是以流体作为研究对象，以高等数学连续函数作为数学工具，采取试验分析与理论研究相结合的方法，来探讨流体处于平衡或运动状态时的力学规律及其与边界间的相互作用规律的一门科学。同时工程流体力学还要着重研究这些力学规律在工程实际问题中的应用。因此，它也是一门应用力学。流体力学这门科学是高等工科院校学生必须掌握的一门基础技术课，不仅仅是航空、动力、电机、船舶制造、机械类专业必须掌握这门科学知识，而且从事农业工程的有关专业人员也应该学习并掌握它。在农业工程实际中常会遇到液体或气体，也许要利用流体的能量，也许要利用流体的平衡或运动状态的力学规律。农业要实现排灌机械化，就要掌握和应用流体的各个力学规律来合理设计、正确计算工程问题，诸如拖拉机的发动机中冷却水泵的计算、润滑理论的分析、汽化器中燃料与空气的分配及汽油发动机汽化器的浮子室设计、各种泵与压力表、流量计、测速仪等仪表，以及液压或气压传动装置的设计、缝隙渗漏量的分析等均需利用流体力学的知识来研究解决。

## §1-1 流体及其连续介质假定

### 一、流体

流体同固体一样，是由具有一定间隙的、运动着的分子所组成，但其分子间距较固体大得多，而分子间内聚力较固体却小得多，可以说是非常微弱的。它在极小外力作用下就会产生很大的变形（即流动），在无外力而只有自身重量作用下也会发生流动变形。如一碗牛奶或一杯水倾覆后，立刻漫成一滩；又如一滴油漆或纸浆液在平板上会变得越来越扁平。这些变形过程均无外力作用，仅有它们自身的重量影响。所以说，凡是在一般情况下不能像固体一样保持一定形状的物体，就称为流体。

流体包括液体与气体。液体的分子间距较气体的小，其分子排列较气体紧密得多，它们的分子距与分子有效直径几乎相等；而气体的分子距与分子有效直径相差悬殊，如空气的分子距为  $3 \times 10^{-7} \text{cm}$ ，分子有效直径的数量级为  $10^{-8} \text{cm}$ 。由于分子排列的松散紧密程度的差异，使得流体与固体间、液体与气体间具有不同性。

液体分子力较强（相对于气体），在极大的外力作用下，其体积只可能产生极微小的变化，通常认为是不可压缩的流体；气体分子力较弱，在较小外力作用下，其体积亦产生较大的变化，通常称为可压缩流体。由于这种压缩性的不同，液体具有一定体积，而气体通常随容器大小变化，即气体具有占据、充满空间的特性。分子距较大的气体，随着温度的升高，其乱运动加剧，在其间运动的固体所受到的阻力也随之增大；而分子距小的液体，随着温度的升高，其引力减小，在其间运动的固体所受到的阻力也随之减小。在流体力学中，将这种阻碍运动的特性称为流体的粘性。所以说，液体的粘性随温度升高而减小，气体则反之。液体与气体的另一不同性是液体由于其分子引力较大而具有力求自身表面收缩到最小的特性；气体则只有



充满、占据空间的特性。因此液体具有自由面（自由面是指液体与气体的交界面），气体则没有。

流体与固体的不同性质也可以从力学特性来区别。流体不能承受拉力，平衡状态时不能受剪切、不存在静摩擦力。在弹性极限范围内，流体的应力与应变率成正比，固体的应力与应变成正比；在弹性极限范围内，流体的应变与应力作用的时间有关，固体的应变与应力作用的时间无关；当外力移去后，流体的变形不能恢复原状，固体能恢复到原状。关于流体的这些力学特性将在讲解流体主要力学性质及其他有关内容时得到论证。

## 二、流体连续介质假定

如果从物理学微观地分析研究流体的运动，必然从组成流体的每一个分子的受力及其运动着手，但如果分子力不很强、分子运动又十分复杂，它们的运动及其规律就难于用数学方程加以描述。另外，在工程实际中，所涉及的尺寸远远超过了分子距，故只求得到大量分子的统计平均特性即可，而无需个别分子的微观运动规律。如放置桌上的一瓶油，从宏观角度看，油在瓶里是静止的。而从微观上看，油分子始终没停止乱运动。在工程实际应用中，前者才有意义。所以人们放弃流体分子结构不管，假定流体是由连续的、无数无间隙的，且具有流体一切属性的质点（也可称微元体）所组成的一种介质。流体力学就是从宏观角度来研究流体问题的。在一般情况下，这种假定是符合工程实际的精度要求的。例如在 $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $0^\circ\text{C}$ 的标准状态下， $1\text{cm}^3$ 的液体中就有 $3 \times 10^{24}$ 个分子。可见分子本身和它的分子距是极微小，而质点中包含的分子数又是足够大的。

可见，在流体连续介质假定中，质点（或称微团）可以作为流体基元体积完全充满流动空间，其物理性质和各运动参量在空间连续分布，质点本身的几何尺寸与流动空间和流体中固体的尺度相比较极其微小，可以忽略。

值得注意的是这个假定有相对性。当所研究的对象，其特征尺寸接近或小于流体的特征尺寸时，就不可采用该连续介质假定。例如在高真空的真空泵中，温度为 $293\text{K}$ 的空气，当压力为 $133.336 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时，空气分子距达 $4.5\text{mm}$ ，相对于真空泵的尺寸， $4.5\text{mm}$ 的分子距就不可忽略，此时的空气不可视为连续介质，否则会导致错误的结论。又如在液体流动过程中，局部区域的压强降低且产生汽化现象，形成气穴，此时液流的运动也不可视为连续的。另外，如果所研究的流体的物理现象与其分子运动有着密切关系，这种情况下绝对不可采用连续介质假定，但对于流体的粘性及液体的表面张力除外，因为流体的这些宏观特性是由微观分子间的相互作用决定的。

## §1-2 流体的主要物理性质

流体在平衡或运动过程中所发生的一切现象与具有的特性，都与它们的物理性质密切相关。因此在没有研究讨论流体的各种现象与力学规律前，首先要了解其物理性质、物理性质间的相互关系及表征其物理属性的参量和度量大小的标准（即单位）。

从力学观点看，流体与固体的主要差别就在于它们对外力抵抗能力的不同。固体有一定的能力抵抗拉力、剪切力及压力，且伴随着一定的变形以抵抗外力。流体却不能承受拉力，在平衡状态时还不能抵抗剪切力。在极微小的剪切力作用下将产生连续不断的变形，直至剪切力消失为止（即流体的易流动性）。外力移去流体也不能恢复原状。

### 一、惯性与密度

流体与固体一样，具有维持原有运动状态的特性。流体运动发生变化时，流体将产生惯性力。惯性越大，流体运动状态越不容易改变，否则相反。

惯性大小与流体质量密切相关。单位体积具有的流体质量称为密度。流体的种类不同，密度也不同。对于非匀质流体密度

$$\rho_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中  $\rho_i$ ——非匀质流体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；  
 $\Delta V$ ——某点  $i$  中心处微小流体体积 ( $\text{m}^3$ )；  
 $\Delta m$ ——该微小流体体积  $\Delta V$  具有的质量 ( $\text{kg}$ )。

对于匀质流体的密度

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

式中  $\rho$ ——匀质流体的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

引进密度的概念，为今后研究流体运动时截取脱离体作为研究对象提供方便，也可比较同体积而不同种类的流体惯性。

惯性力的大小等于运动流体的质量与其加速度的乘积，惯性力的方向与流体运动加速度方向相反。

流体作直线运动时的惯性力大小为

$$F' = ma \quad (1-3)$$

式中  $F'$ ——流体质点作直线运动时的惯性力 ( $\text{N}$ )；  
 $m$ ——流体的质量 ( $\text{kg}$ )；  
 $a$ ——流体质点作直线运动时的加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )。

流体作曲线运动时的离心惯性力大小为

$$F = m\omega^2\gamma \quad (1-4)$$

式中  $F$ ——流体作曲线运动时的惯性力 ( $\text{N}$ )；  
 $m$ ——流体作曲线运动时的质量 ( $\text{kg}$ )；  
 $\omega$ ——流体作曲线运动时的旋转角速度 ( $\text{rad}/\text{s}$ )；  
 $\gamma$ ——运动流体离旋转中心的距离，即流体运动时的曲率半径 ( $\text{m}$ )。

### 二、万有引力特性

世间万物，无论是在地球上还是在宇宙间都有彼此吸引的力。这种力企图改变流体原有运动状态，使之彼此接近。

在一般情况下，对流体起引力作用的只是地球的吸引力。流体受地球引力的特性，称为重力特性。重量  $G$  的大小与流体质量  $m$  有关。

$$G = mg \quad (1-5)$$

式中  $g$ ——当地重力加速度。与流体所在位置（高度）有关。工程中常采用  $9.81\text{m}/\text{s}^2$ ；  
 $G$ ——流体体积为  $V$  时的重量。

单位体积的流体质量与重力加速度的乘积，即单位体积流体所具有的重量称为重度（或容重），用  $\gamma$  表示。

$$\gamma = \rho g = mg/V = G/V$$

式中  $\gamma$  ——流体的重度 ( $\text{N/m}^3$ )。

对于非匀质流体, 某点的重度为

$$\gamma_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-6)$$

式中  $\gamma_i$  ——某点处流体的重度;

$\Delta G$  ——微小体积  $\Delta V$  的流体重量。

在工程中, 常遇到流体相对密度这一概念。它是指流体的密度 (或重量、质量、重度) 与同体积、温度为  $4^\circ\text{C}$  时蒸馏水的密度 (或重量、质量、重度) 的比值  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{G}{G_w} = \frac{m}{m_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (1-7)$$

式中  $\varepsilon$  ——流体的相对密度;

$G_w, \rho_w, m_w, \gamma_w$  ——分别为  $4^\circ\text{C}$  时蒸馏水的重量、密度 ( $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ )、质量、重度 ( $\gamma_w = 9810\text{N/m}^3$ )。

流体的重度、密度都随温度和压强变化。

### 三、压缩性与膨胀性

在温度一定的条件下, 流体在外力作用下具有改变自身体积的特性。压缩性是流体阻止自身体积变小的一种性质; 弹性是流体在弹性极限内外力取消后恢复原状的一种性质。其中, 由于弹性产生的弹性力是流体受外力 (压力) 改变时所产生的一种企图恢复原状的内力。这些特性对于液体与气体各不相同, 需分别论述或表达。

#### 1. 液体的压缩性与膨胀性

液体的质量一定, 当压强增大时, 其体积随之缩小, 密度同时增大的特性, 称为液体的压缩性。其大小可用压缩性系数  $\beta_p$  或弹性模数  $K$  来表示。 $\beta_p$  表示液体体积的相对压缩值  $\frac{dV}{V}$  (又称体积应变率) 与压强增量  $dp$  的比值。即

$$\beta_p = -\frac{dV}{V} \cdot \frac{1}{dp} \quad (1-8)$$

或

$$\beta_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp} \quad (1-8a)$$

式 (1-8) 中负号表示压强增加 ( $dp$  为正值), 体积被压缩, 二者符号相反。为使  $\beta_p$  为正数, 则式 (1-8) 中加一负号。

流体压缩性也可用压缩性系数的倒数——体积弹性系数  $K$  表示。即

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-9)$$

$\beta_p$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ ,  $K$  的单位为  $\text{N}/\text{m}^2$ 。它们都是液体压缩性的度量。 $\beta_p$  值越小或  $K$  值越大, 说明液体越不易被压缩。液体种类不同,  $\beta_p$  和  $K$  的值不同。同一种流体的  $\beta_p$  和  $K$  值也随温度和压强而改变, 但在一般状态下变化不大, 可视为常数。如水的  $K$  值在常温常压情况下可取  $2.02 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。当压强每增加  $98100 \text{N}/\text{m}^2$ , 水的体积大约减小  $0.005\%$ , 即

$$-\frac{dV}{V} = \beta_p \cdot dp = \frac{1}{K} dp = \frac{9.8 \times 10^4}{2.02 \times 10^9} \approx 5 \times 10^{-5}$$

可见，以水为代表的其它液体，其压缩性是很小的。当气体运动速度在50~70m/s以下压强变化又不大时，一般可以忽略。表1-1列出了0℃时水的压缩性系数随压强变化值。

表1-1 0℃水在不同压力下的 $\beta_p$ 值

压力 $\times 10^5$ (Pa)	4.90	9.81	19.61	39.23	78.45
$\beta_p \times 10^{-9} \left( \frac{1}{Pa} \right)$	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

表1-2列出了在标准大气压下空气和水的物理性质。

表1-2 在标准大气压下空气、水的物理性质

流体类别	温度 $t$ (℃)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	重度 $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> )	动力粘度 $\mu \times 10^5$ (Pa·s)	运动粘度 $\nu \times 10^5$ (m <sup>2</sup> /s)
空气	0	1.293	12.68	1.71	1.32
	10	1.248	12.24	1.76	1.41
	20	1.205	11.82	1.81	1.50
	30	1.165	11.43	1.86	1.60
	40	1.128	11.06	1.90	1.68
	60	1.060	10.40	2.00	1.87
	80	1.000	9.81	2.09	2.09
	100	0.946	9.28	2.18	2.31
水	0	999.8	9805	178.1	0.1785
	5	1000.0	9807	151.8	0.1519
	10	999.7	9804	130.7	0.1306
	15	999.1	9798	113.9	0.1139
	20	998.2	9789	100.2	0.1003
	30	995.7	9764	79.8	0.0800
	50	988.0	9689	54.7	0.0553
	70	977.8	9589	40.4	0.0413
	90	965.3	9466	31.5	0.0326
	100	958.4	9399	28.2	0.0294

如果压力一定，流体体积将随温度的变化而改变。我们把一定质量的流体体积和随温度升高而增大的特性称为流体的膨胀性。膨胀性大小用膨胀性系数 $\beta_t$ 度量， $\beta_t$ 表示流体在一定压力（且质量不变）的条件下，每增加一个单位温度时其体积相对增大的量。即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-10)$$

式中  $\beta_t$ ——流体膨胀性系数 (1/℃)；

$\frac{dV}{V}$ ——流体的温度变化 $dt$ 时，体积增量与原体积的比值，即为流体体积相对增量或流体应变率；

$dt$ ——温度增量 (℃)。

表1-3示出压力、温度对 $\beta_t$ 值的影响。表1-4为几种液体的 $\beta_t$ 平均值。

对于液体而言，膨胀性系数 $\beta_t$ 很小，如水在 $1.01325 \times 10^5$ Pa，40~50℃时，其 $\beta_t = 422 \times 10^{-6} / \text{℃}$ 。

液体的膨胀性与压力也有关。一般地讲，液体膨胀性随压力增高而减小，即 $\beta_v$ 值降低。但其中水的膨胀性系数值却随压力的增高而略有增加，如表1-3所示。

综上所述，液体压缩性与膨胀性，在一般状况下是很小的，甚至可以忽略。这表明液体抵抗压力作用的能力很强，可视为体积不变，即具有一定体积，呈不可压缩性。但在某些特殊情况下必须考虑液体的压缩性与膨胀性，如有压管道中的水锤现象，如果将管道内的液体视为不可压缩、体积为定值的话，将会造成较大偏差或错误，甚至造成工程上破坏性事故。又如在高压锅炉中，因压力、温度的变化较大，就一定得考虑其压缩性和膨胀性。

表1-3 水在不同压力、温度下的 $\beta_v$ 值

压力 $\times 10^5$ (Pa)	温 度 (°C)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	80~100
	$\beta_v \times 10^4 (1/^\circ\text{C})$				
1	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
100	0.43	1.65	4.22	5.48	7.04
200	0.72	1.83	4.26	5.39	—

表1-4 几种液体的 $\beta_v$ 平均值

类 别	水 银	甘 油	水	矿 物 油	蓖 麻 油	乙 醇
$\beta_v(1/^\circ\text{C})$	0.0001815	0.00053	0.0002	0.0007~0.0012	0.00065	0.0011

## 2. 气体的膨胀性与压缩性

当压力或温度、或密度改变，对于质量一定的气体，应该考虑其压缩性或膨胀性影响。一般情况下，在气体运动过程中，其状态变化及参量的表征，压力、温度、密度（或体积）三者间的关系遵循理想气体状态方程，并与热力过程紧密相关。

气体状态方程

$$vp = RT \quad (1-11)$$

$$\frac{1}{\rho} = v \quad (1-12)$$

式中  $p$  —— 气体运动过程中某状态对应的绝对压强 (Pa)；

$\rho$  —— 对应状态中气体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )；

$v$  —— 对应状态中气体的比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；

$T$  —— 热力学温度，又称开尔文温度 (K) ( $T = T_0 + t^\circ\text{C}$ ； $T_0 = 273\text{K}$ ，为标准大气压  $p_{\text{atm}} = 101325\text{Pa}$ ，温度为  $0^\circ\text{C}$  时所对应的热力学温度)；

$R$  —— 气体常数。

将标准状态下的参数  $p_{\text{atm}} = p_0 = 101325\text{Pa}$ ， $v_0 = 0.773\text{m}^3/\text{kg}$ ， $T_0 = 273\text{K}$  代入式 (1-11)

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = 287.33\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K} \approx 287\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}.$$

由此说明气体常数  $R$  值是在质量为  $1\text{kg}$ 、压力一定的条件下，加热后升高温度  $1\text{K}$  时所做的膨胀功  $287\text{J}$ 。

在气体动力学中，一般均以空气为对象来探讨气体运动规律，所以在阐述气体力学规律

或各参量时均为空气运动过程中的量。状态方程式 (1-11) 亦如此。但如果气体运动中, 有的参量变化甚微, 则可忽略, 视该状态无变化。例如下述几种特殊情况下的状态方程:

(1) 等温过程 气体在整个状态变化过程中温度保持不变的现象, 称为等温过程。表征这个状态的各参量仍遵循方程式 (1-11), 即气体的压强与比体积乘积为定值

$$\left. \begin{aligned} p\nu &= C \\ \text{或} \quad \frac{p}{p_0} &= \frac{\rho}{\rho_0}; \quad \frac{p}{p_0} = \frac{r}{r_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中  $C$ ——常数;

$p_0, \rho_0, r_0$ ——分别为气体的初始状态的绝对压强、密度、重度;

$p, \rho, r$ ——分别为气体状态变化过程中的绝对压强、密度、重度。

式 (1-13) 称为玻义耳 (Boyle) 定律的表达式, 表明在等温过程中, 气体的比体积与压力成反比, 密度或重度与压力成正比关系变化。

在工程实际中, 凡是气体状态变化缓慢, 或气流速度较低时, 气体能与外界进行充分的热交换, 即认为它与外界的温度相同, 可以按等温过程处理。如缓慢充气或排气时, 贮气罐中的气体状态变化为缓慢压缩或缓慢膨胀的过程, 均视为等温过程。

(2) 等压过程 在气体状态变化过程中, 压强保持定值。表征其状态的各参量间仍然遵循状态方程式 (1-11)。即

$$\left. \begin{aligned} pT &= C \\ \rho_0 T_0 &= \rho T = C \\ \text{或} \quad \rho &= \rho_0 \frac{T_0}{T_0 + t} = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta_i t} \\ r &= r_0 \frac{1}{1 + \beta_i t} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中  $C$ ——常数;

$\beta_i$ ——气体膨胀系数。  $\beta_i = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ 。

式 (1-14) 称为盖·吕萨克 (Gay-Lussac) 定律。它说明气体在等压过程中, 比体积与温度成正比。或者说密度、重度与温度成反比关系变化。

盖·吕萨克定律的意义还可从气体膨胀系数  $\beta_i$  得知: 在压力不变时, 一定质量的气体体积随温度升高而膨胀, 温度每升高 1K, 其体积就增加 273K 时体积的  $\frac{1}{273}$ 。

在工程实际中, 倘若压力变化小而温度变化较大, 一般可按等压过程处理。如在热气流烘砂的气力输送系统中, 温度变化较大, 一般可由 200℃ 降至 50℃, 而压力变化相对较小, 这就可视作等压过程。

(3) 绝热过程 气体在状态变化过程中既不向外散热, 又无热量输入。表征这一状态的关系仍遵循方程式 (1-11), 即

$$p \cdot \nu^k = C \quad (1-15)$$

将式 (1-15) 与式 (1-11) 联立可得

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-16)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$ ——变化前后的温度 (K);  
 $v_1$ 、 $v_2$ ——变化前后的比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  
 $p_1$ 、 $p_2$ ——变化前后的压力 (Pa);

$k$ ——比热比 (绝热指数),  $k = \frac{c_p}{c_v}$ 。

对于空气和多原子气体, 在通常的温度下可取  $k=1.4$ 。常见气体的一些物理性质见表 1-5。

表1-5 几种常见气体在标准海平面和20°C时的物理性质

气 体	化学符号	分子量	密 度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	动力粘度 $\mu \times 10^5$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )	气体常数 $k$ ( $\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ )	比定压热容 $c_p$ ( $\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ )	比定容热容 $c_v$	比 热 比 $k = \frac{c_p}{c_v}$
空 气		29.0	1.205	1.8	287	1003	716	1.4
二氧化碳	$\text{CO}_2$	44.0	1.84	1.48	188	858	670	1.28
一氧化碳	$\text{CO}$	28.0	1.16	1.82	297	1040	743	1.4
氦	$\text{He}$	4.0	0.166	1.97	2077	5220	3143	1.66
氢	$\text{H}_2$	2.02	0.0839	0.90	4120	14450	10330	1.40
甲 烷	$\text{CH}_4$	16.0	0.668	1.34	520	2250	1730	1.30
氮	$\text{N}_2$	28.0	1.16	1.76	297	1040	743	1.40
氧	$\text{O}_2$	32.0	1.33	2.00	260	909	649	1.40
水蒸气	$\text{H}_2\text{O}$	18.0	0.747	1.01	462	1862	1400	1.33

在实际工程中, 如气动震实造型机的震击缸的进气与排气过程进行得很快, 气体来不及与外界进行热交换。这种以气体为工作介质, 从初始到终了的状态变化极快, 可视为与外界无热交换, 即绝热过程。

(4) 多变过程 气体状态变化如果为不完全冷却下的压缩, 或为不完全加热下的膨胀, 或为被加热压缩、被冷却膨胀等多变过程, 就可按多变方程行进计算。多变方程为

$$\frac{p}{\rho^n} = \text{常数} \quad (1-17)$$

式中  $n$ ——多变指数。当气体为不完全冷却下的压缩或气体为不完全加热下的膨胀时,  $1 < n < k$ ; 若气体被加热压缩或被冷却膨胀, 如小型鼓风机等, 则  $n > k$ ; 若为水冷式压气机所压缩的气体, 则  $n < k$ 。

#### 四、表面张力特性

在流体内每个分子被它周围的其它分子所吸引, 并在各个方向上的吸引力都相等。但是, 两种物体的液面交界面 (无论是液体与气体的交界面, 或液体与固体的交界面, 还是两种在常温常压下互不混掺的液体交界面) 附近的分子都会受到各自的分子引力作用。这种液面层内的分子引力是不平衡的。以液体与气体的交界面内的分子引力而言, 向下的吸引力较向上的大。这个不平衡的且作用在液体表层 (或称自由面) 的力, 称为表面张力。如图 1-1 所示, 液体表面层分子引力作用不平衡。设分子引力作用半径为  $r$ , 若取

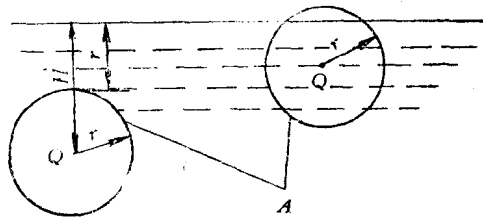


图1-1 液体表面层分子引力

液体表层厚为  $r$ ，在  $r$  层内任取一质点  $Q$  为中心，以  $r$  为半径的球面  $A$ ，球面  $A$  内各个分子都对质点  $Q$  有吸引力。但在  $Q$  点以上的液体分子比以下的少，下部液体分子对  $Q$  质点引力比上部液体分子的大。这样就使  $Q$  点受到一个向下的拉力。这种拉力即表面张力  $\sigma$ 。在液面以下距离小于  $r$  的表层内每一个分子均受有表面张力，而在液面以下其距离大于或等于  $r$  的液体分子都受有平衡的分子吸引力。

表面张力  $\sigma$  有使液体表层内的分子以弹性膜的形式拉向内部，使液面有趋向最小的特性，或者说液体因此而呈球形，液面有收缩呈最小的趋向。这一现象在日常中经常可见，如晾衣的铅丝或室外电线上欲滴落的雨滴。又如将一分的硬币轻轻地平放在静静的或略有挠动的水面上而不下沉，且在硬币与水面交界面附近，清楚的显示液面像弹性膜一样被硬币重力作用后被拉伸的现象（图1-2）。

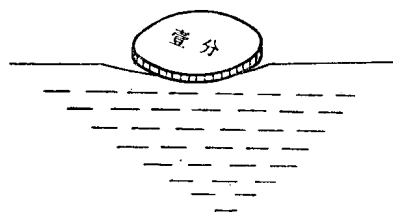


图1-2 液体表现弹性膜形式

表面张力  $\sigma$  的大小用液体自由表面的单位线性长度上的作用力表示，常用的单位是  $N/m$ 。表面张力  $\sigma$  与液体的种类和温度有关，一般可由实验测定。表1-6列出几种液体在不同温度情况下的  $\sigma$  值。

表1-6 某些液体的表面张力  $\sigma$  值

种类	相接触介质	温度 ( $^{\circ}C$ )	$\sigma$ (N/m)	种类	相接触介质	温度 ( $^{\circ}C$ )	$\sigma$ (N/m)
水	空气	0	0.0756	定子油	空气	20	0.0317
水	空气	20	0.0728	甘油	空气	20	0.0223
水	空气	60	0.0662	四氯化碳	空气	20	0.0268
水	空气	100	0.0589	橄榄油	空气	20	0.032
苯	空气	20	0.0289	氧	空气	-193	0.0157
肥皂液	空气	20	0.025	氮	空气	-247	0.0052
水银	空气	20	0.465	乙醚	空气	20	0.0168
水银	水	20	0.38	乙醚	水	20	0.0999

在工程实际中，一般的流体问题不涉及表面张力  $\sigma$  的问题，但有些问题必须考虑液体的表面张力的影响。如内燃机燃烧过程中燃料雾化理论，喷灌与滴灌中喷洒雾化问题，人工降雨过程的雨滴雾化等，都必须考虑液体的表面张力的作用。在实际中正确分析是否可以忽略表面张力的影响是重要的。

液体表面形状取决于相邻接两种介质的性质。这种性质主要指液体内部分子间的吸引力，和液体与相邻介质接触面间的附着力等有关。例如水滴落在洁净的玻璃板上，立刻会漫开成一小片薄薄的水层附着在玻璃板上，水银滴落在玻璃板上则是紧缩成小球状在玻璃板上滚动。前一现象说明水滴内分子引力小于水分子同玻璃的附着力，后一现象说明水银分子间吸引力比水银同玻璃板的附着力大。在流体力学中，凡是液体内部分子间吸引力大于液体同固体间的附着力时，就称该液体对此固体不湿润，液体称不湿润液体。凡液体内部分子间吸引力比液体同固体间附着力小时，称该液体对此固体湿润，液体称湿润液体，如图1-3所示。在容器内装有湿润液体，则在贴近器壁的液体表面沿壁面向上弯曲，细的试管插入后，管内液面上升，形成向上弯曲的凹面，且管内自由液面高出容器内液体的自由液面；若如图1-4所示，在容器内装不湿润液体，则在贴近器壁的液体自由面沿壁面向下弯曲，将细的试管插入后，管内液



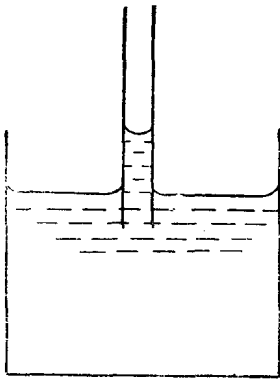


图1-3 湿润液体呈凹形自由面

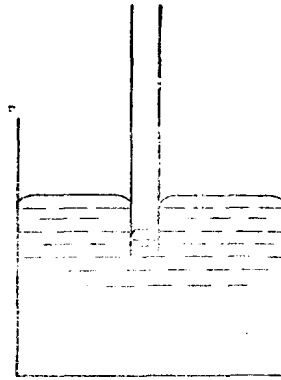


图1-4 不湿润液体的自由面

面下降且向下弯曲，形成凸形自由面，且管内凸形自由面低于容器内凸形自由面。

在流体力学中，将细管插入湿润流体或不湿润流体中，流体沿壁管上升或下降的现象，均称为毛细现象，所用的管称为毛细管。毛细现象与液体表面张力关系甚为密切。图1-5所示为湿润液体在毛细管中的上升情况。液体在毛细管中上升高度为  $h$ ，且液面为凹面，其表面张力合力为  $\sigma \cdot 2\pi r$ ，该合力使液体在毛细管内上升至高度  $h$  时静止不动。用等式表达为

$$\sigma 2\pi r \cos\theta = \gamma \pi r^2 h$$

其上升高度 
$$h = \frac{2\sigma}{r \cdot \gamma} \cos\theta \quad (1-18)$$

式中  $h$  ——自由液面上升高度；

$\sigma$  ——表面张力；

$\gamma$  ——液体重度；

$r$  ——毛细管内孔半径；

$\theta$  ——湿润角或接触角。对湿润液如水，一般取  $\theta = 0^\circ \sim 9^\circ$ ；对不湿润液体如水银，一般取  $\theta = 130^\circ \sim 180^\circ$ 。当毛细管过细时，湿润液体如水的  $\theta$  值可取  $0^\circ$ ，不湿润液体如水银的  $\theta$  值可取  $180^\circ$ 。

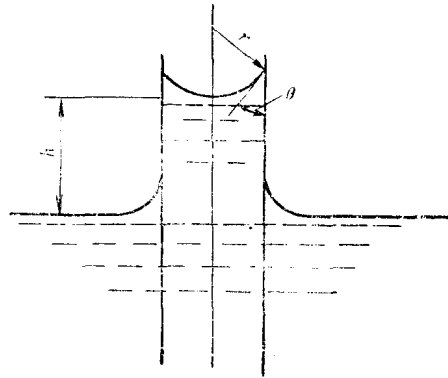


图1-5 湿润液体在毛细管中上升

毛细现象对实际工程很有意义。在机械工程中依据毛细原理设计并制造了测定油液粘性的粘度计。在农田，为保持地表层含水量，必须破坏土壤中形成的毛细管，就要耕耘土地，以免土壤中水分因毛细现象而蒸发散失；以流体作工作介质的测压管，为避免在管内形成毛细现象而影响量测精度，其管径  $d$  的大小应适当，一般  $d \geq 10\text{mm}$ 。

另外，对于  $20^\circ\text{C}$  时的湿润液体水和不湿润液体水银在毛细管内上升的高度，可以分别用下式计算

$$h_{\text{水}} = \frac{29.8}{d} \text{ mm}$$

$$h_{\text{水银}} = \frac{10.15}{d} \text{ mm}$$