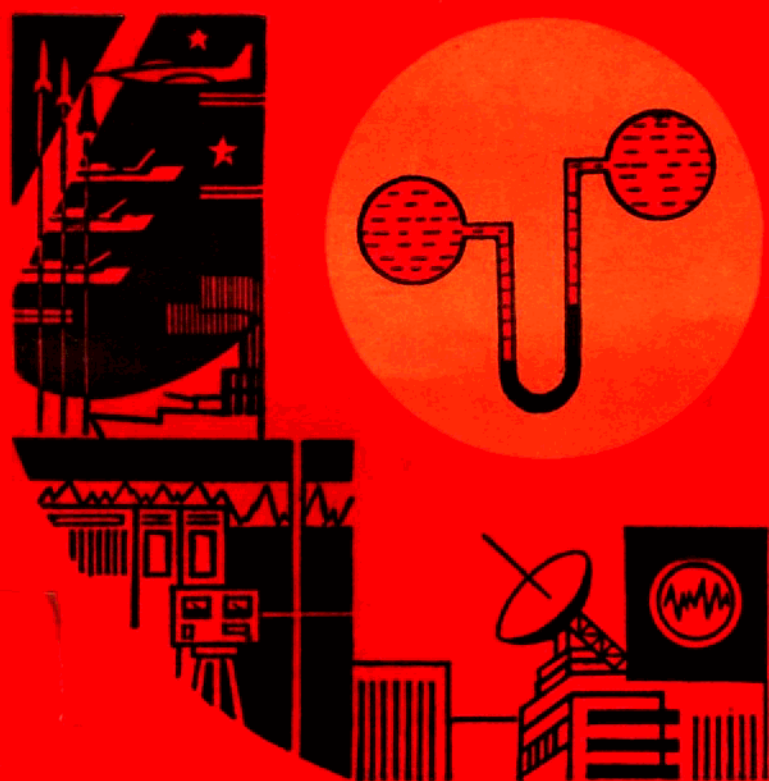


计量中专试用教材

# 流体力学基础

常理民 董超 编



中国计量出版社

## 出版前言

国家技术监督局是国务院统一管理和组织协调全国技术监督工作的职能部门，负责管理全国标准化、计量、质量监督工作，并对质量管理进行宏观指导。

随着技术监督事业的迅速发展，当前迫切需要大量的各级、各类计量专门人才。举办各种形式的计量中等教育，对于提高在职计量人员的素质，改善计量队伍的结构，培养一批计量队伍的新生力量，都具有重要意义，并将对计量事业的发展产生深远影响。

近几年来，由于一批计量中专学校的创办，各种形式的计量中等教育如委托或联合办计量中专班、计量函授中专、计量职业高中、计量中专的专业证书培训等，也在各地陆续开展起来，但是缺少教材已成为计量中等教育迫切需要解决的重大问题。因此，我们根据国家技术监督局的决定，组织编写了一套计量中专教材，其中包括：几何量、热工、力学、电磁学计量四个专业的部分专业基础课和专业课试用教材，争取在1988至1991年内出齐。

本书是委托河北省标准计量学校组织编写的热工计量专业的专业课教材。

计量事业教育基础十分薄弱，组织编写行业性教材还是第一次，基本条件和经验都不足，因此，这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面努力，但仍然存在很多不足之处。我们拟在试用过程中听取各方面意见，于适当时机再次组织修改。

另外，这套教材主要是根据三年制全脱产的计量中等专业教育的需要编写的。在目前情况下，要对各种形式的计量中等教育都编出相应的教材难以做到。因此，在编写过程中，也一定程度地考虑了适用的多样性。其他形式的计量中等教育可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

在教材的编写、审议过程中，得到了中国计量出版社、中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国计量学院、中国计量测试学会，河北、四川、山东、吉林省标准计量局及有关的高等院校、省市计量部门、科研单位、大中型企业的大力支持，在此，谨表示衷心感谢！

国家技术监督局宣传教育司

1988. 8

## 编 者 的 话

流体力学基础是热工计量专业及相近专业的一门重要专业基础课。本教材是按照国家技术监督局教育处召集的计量中等专业学校教材编写会议所制定的“流体力学基础教学大纲”组织编写的。

该教材注重基础理论的应用,结合热工计量专业特点,着重讲述流体的性质、平衡规律和一元流动的几个基本方程。对该专业常遇到的管内流动等问题,作了较为详细的叙述。在内容的安排上,既注意保持本学科的系统性,又遵循由浅入深、由易到难的认识规律,侧重基本概念的阐述及基本原理的应用,避免了大量繁琐的数学推导。各章均编有一定数量的思考题和习题,以培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。

本教材由河北省标准计量学校常理民、董超编写,常理民统稿,华北电力学院刘志昌副教授主审。

在编写过程中,参加审稿会的各位专家提出了许多宝贵意见,同时还得到国家技术监督局教育处安国处长及章学峰同志,中国计量出版社陈葵、孙斌斌同志的大力支持,谨在此一并致谢。

编者水平有限,成书又很仓促,疏漏与不妥之处,恳请读者指正。

编 者

1990年6月

# 目 录

|                        |      |
|------------------------|------|
| 绪论                     | (1)  |
| 第一章 流体的主要物理性质          | (3)  |
| 第一节 流体的特性              | (3)  |
| 第二节 流体的重度与密度           | (4)  |
| 第三节 流体的压缩性与膨胀性         | (5)  |
| 第四节 流体的粘性 & 内摩擦定律      | (8)  |
| 第五节 表面张力和毛细现象          | (10) |
| 第六节 液体的蒸发与沸腾、气体的溶解     | (12) |
| 第七节 作用在流体上的力           | (13) |
| 思考题及习题                 | (15) |
| 第二章 流体静力学基础            | (16) |
| 第一节 流体静压力及其特性          | (16) |
| 第二节 重力作用下的液体平衡         | (19) |
| 第三节 绝对压力、相对压力及真空       | (21) |
| 第四节 流体静力学基本方程的意义       | (23) |
| 第五节 帕斯卡定律及其应用          | (25) |
| 第六节 液柱式测压计             | (27) |
| 第七节 平面上的液体总压力          | (31) |
| 第八节 曲面上的液体总压力          | (34) |
| 第九节 阿基米德原理、潜体和浮体的平衡    | (37) |
| 思考题及习题                 | (42) |
| 第三章 流体动力学基础            | (49) |
| 第一节 研究流体运动的两种方法        | (49) |
| 第二节 流动的几个基本概念          | (50) |
| 第三节 管流的连续方程            | (55) |
| 第四节 理想流体微小流束的伯努利方程及其意义 | (56) |
| 第五节 实际流体微小流束的伯努利方程     | (62) |
| 第六节 流体的缓变流动和急变流动       | (63) |
| 第七节 实际流体总流的伯努利方程       | (64) |
| 第八节 总流伯努利方程的应用         | (67) |
| 第九节 定常流的动量方程           | (74) |
| 第十节 气体的一元流动            | (78) |
| 第十一节 相似理论              | (90) |
| 思考题及习题                 | (95) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第四章 流体在管道中的流动</b> .....  | (100) |
| 第一节 雷诺实验与临界雷诺数 .....        | (100) |
| 第二节 圆管中的层流、达西公式 .....       | (103) |
| 第三节 圆管中的紊流运动 .....          | (107) |
| 第四节 局部水头损失的计算 .....         | (112) |
| 第五节 管路的水力计算 .....           | (117) |
| 第六节 水锤现象 .....              | (124) |
| 第七节 气穴与气蚀 .....             | (126) |
| 第八节 孔口和管嘴液体的出流 .....        | (127) |
| 第九节 气体管流的基本理论 .....         | (134) |
| 思考题及习题 .....                | (137) |
| <b>第五章 平面流 绕流 两相流</b> ..... | (142) |
| 第一节 旋涡运动 .....              | (142) |
| 第二节 附面层的概念 .....            | (145) |
| 第三节 流体绕曲面流动及卡门涡街 .....      | (147) |
| 第四节 两相流简介 .....             | (150) |
| 思考题及习题 .....                | (155) |

# 绪 论

流体力学是力学的一个分支,它是利用理论与实验相结合的方法,来研究流体处于平衡、运动时和流体与固体相互作用的力学规律,同时研究如何利用这些规律来解决工程问题。

流体包括液体和气体两部分。流体力学从它所研究的对象来看,可以分为两部分:一部分是液体力学,它所研究的是不可压缩流体——主要是指液体的平衡和运动规律,因为通常讨论的液体是水,所以一般称为水力学;另一部分是气体动力学,它所研究的是可压缩流体——气体运动的基本规律,由于最常见的气体是空气,因此它又称为空气动力学。当气体的流速、压力不大,比容变化不多,压缩性影响可略去不计时,液体的各种规律对气体也是适用的。

流体力学和其他科学一样,是人类在生产实践中建立和发展起来的。远在太古时代,当人类开始与大自然斗争的时候,就开始了与洪水的斗争。例如,在公元前2286~2278年,我国有著名的大禹治水;公元前250年,我国有著名的都江堰工程等等。由于与自然斗争的需要和实践,使人们逐渐积累了许多关于流体方面的知识,不过这些知识还停留在一般经验基础上,没有能进行系统地总结与提高。直到公元前250年才出现第一个科学原理,即阿基米德在《论浮体》一文中所提出的阿基米德原理。但在以后的近17个世纪中,由于中世纪封建农奴制度的统治,生产力受到束缚,流体力学也和其他科学一样未得到新的发展。一直到了18世纪,由于伯努利和欧拉方程的建立,才奠定流体力学的基础。

近年来,流体力学已发展成为一门独立而又比较完善的学科,并已广泛应用到国民经济各个领域,在生产实践中作出了有益的贡献。例如:水利建设、动力工程、航空航天工程、交通运输、化学冶金、热工计量等,这些无疑都离不开对流体力学的研究。所以说流体力学在工程技术中占有重要地位。近年来不断发展起来的计量流体力学,是从标准计量的观点出发研究流体,及如何应用流体力学理论来指导更精确的计量技术。

目前,研究流体力学的方法有三种:理论、计算、实验。实验研究方法在流体力学研究中有着广泛的应用。流体力学的实验主要是在风洞、激波管、水池管路等实验设备中进行模型实验或实物实验,其优点是能在与所研究问题完全相同或大体相同的条件下进行观测,因此,通过实验得出的结果一般是可靠的。但是,实验往往要受到模型尺寸的限制。此外,还存在边界的影响、相似准则不能完全满足等问题。

研究流体力学的理论方法的特点在于科学的抽象,从而利用数学方法求出理论结果,清晰、普遍地揭示出物质运动的内在规律。

近年来,由于计算机技术的发展及一系列有效近似计算方法的应用(如有限差分、有限元方法等),使数值计算在流体力学研究方法中的地位不断提高,现在已能准确计算飞机外形、喷嘴、汽轮机叶片的最优形式。

这门课程是为热工计量专业设置的技术基础课。学生通过本课程的学习,可以掌握一些基本概念,如与压力、流量、真空计量有关的概念,熟悉它们的法定计量单位及与其它单位

的换算；掌握流体的特性，如膨胀性、压缩性、粘滞性、凝聚力、表面张力、润湿现象、蒸发、沸腾、流体动压力等，并能应用它们解释有关现象；掌握流体静力学原理、定律和基本方程，并能运用它们解释有关现象或进行计算；了解理想流体与实际流体的有压流动与无压流动、定常流动与非定常流动；了解理想气体与实际气体之间的区别与联系，并能用相应的理论进行正确的分析和计算。

# 第一章 流体的主要物理性质

## 第一节 流体的特性

### 一、流体的概念

液体和气体统称为流体。流体由大量的流体分子组成。液体和气体与固体相比较，分子间引力较小，分子运动较强烈，分子排列松散，不能象固体那样抵抗拉力和切力，只能抵抗对它的压缩力作用。只要有运动及变形的可能性，流体就会发生变形或流动。自然界中的流体都具有一定的粘性，因而其流动性也要受到自身的粘性约束，不会无限制地流动。

液体和气体所具有的共同特征是流动性（这种流动性不是无限制的）。但它们也还有一些不同的特征，对气体来讲，它很容易被压缩或使其膨胀，而且它没有自由表面，不能保持一定的形状。由于分子间的斥力很弱，因而容易被压缩。气体分子的自由运动使它能够充满所占容器的空间。另一特点是气体粘性小，而随温度的升高，其粘性加大。

对液体而言，它有自由表面，有固定的体积，在一般情况下液体被看成是不可压缩的流体。因为液体分子间距离比固体分子间距离大，所以引力减弱，不能保持一定的形状，但都比气体分子之间的距离小，分子之间的引力尚能使液体保持一定的体积。在受到压缩时，由于分子的斥力较大，抵抗压缩，因而具有不可压缩性，这一点在实用上是很有意义的。

液体粘性较大，并且随温度的升高而降低。

### 二、流体作为连续介质的概念

流体由大量的流体分子所组成，而分子之间是存在间隙的，由于分子力的作用，这些分子一直在作杂乱无章的运动。从微观上看，这些分子之间是不连续的（有间隙的），如果从研究分子运动出发，进而掌握整个流体平衡与运动的规律，是很困难的。即使在一个很小的体积内，所包含的分子数目也特别多（在标准状况下  $1\text{ }\mu\text{m}^3$  液体中有液体分子  $3.35 \times 10^{19}$  个， $1\text{ }\mu\text{m}^3$  气体中有气体分子  $2.7 \times 10^7$  个），而每个分子的运动又很复杂，所以要列出这些单个分子的运动方程式几乎是不可能的。因此，在研究流体时，可将流体加以理想化，这就是把真正的流体看成是一种由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质，而这种假想的连续介质仍然具有流体的一切基本力学性质。

将流体视为一种连续介质也是可能的，因为流体力学研究的不是个别分子的微观运动，而是由大量分子组成的宏观流体的机械运动。

把流体看作连续介质，我们就可以抛开流体内部复杂的分子运动，而仅研究流体的宏观机械运动。这样，反映流体宏观运动的物理量，象压力、温度、速度等均可看成是在空间坐标上连续分布的，可用数学上的连续函数来描述。数学上一系列的连续函数的研究成果均可用于解决流体力学中的各类问题。



以上便是把流体看作连续介质的假说，它是1753年由欧拉提出的观点。以后一直沿用把流体看作连续介质的观点，并将这种连续介质本身看成由无穷多个连续分布的微小流体团组成，这种微小流体团称之为流体质点，又称流体微团。

应该指出，连续介质的假定也有一定的适用范围。当研究的区域很小，与分子的自由程处于同一数量级时，例如在很稀薄的空气中或高真空技术中，连续介质的假定就不再适用，而必须考虑为不连续介质。另外，当流体性质有局部突变时，连续介质的假定也不适用。例如液体中局部地区压力很低，发生汽化现象形成气穴时，就会破坏液体的连续流动。

## 第二节 流体的重度与密度

### 一、流体的密度

流体和自然界里其它物体一样，具有质量。单位体积内流体所具有的质量称为密度。对于均质流体，其密度等于流体质量与它所占体积的比值，即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.1)$$

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

$M$ ——均质流体的质量 ( $\text{kg}$ )，

$V$ ——均质流体的体积 ( $\text{m}^3$ )。

对于非均质流体，按上式计算出的结果只能表示流体的平均密度，而流体内某一点 $a$ 处的密度 $\rho$ 表示为：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1.2)$$

式中： $\rho$ ——流体内某一点处的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )，

$\Delta M$ ——包含该点的微元流体体积所具有的质量 ( $\text{kg}$ )，

$\Delta V$ ——包含该点的微元流体体积 ( $\text{m}^3$ )。

流体的密度随压力和温度而变化。表1—1给出几种流体在标准大气压 ( $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 下的密度值。

表 1—1 几种流体的密度

| 流体名称 | 温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 密度<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 流体名称 | 温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 密度<br>( $\text{kg/m}^3$ ) |
|------|------------------------------|---------------------------|------|------------------------------|---------------------------|
| 水    | 4                            | 1000                      | 乙醇   | 20                           | 789                       |
|      | 20                           | 998                       | 四氯化碳 | 20                           | 1594                      |
| 水银   | 0                            | 13596                     | 空气   | 0                            | 1.293                     |
|      | 20                           | 13546                     | 空气   | 20                           | 1.205                     |

## 二、流体的重度

任何物体在地心引力作用下,都具有重量。单位体积流体所具有的重量称为重度。对于均质流体,重度等于流体重量与其体积的比值,即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1.3)$$

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

$G$ ——流体的重量 ( $\text{N}$ );

$V$ ——流体的体积 ( $\text{m}^3$ )。

## 三、密度与重度的关系

根据牛顿第二定律,某种物体的重量等于其质量与重力加速度的乘积,即  $G = Mg$ 。于是 (1.1) 和 (1.3) 式,得

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma V}{gV} = \frac{\gamma}{g} \quad (1.4)$$

式中,  $g$  为重力加速度。  $g$  随所处位置的高度而变化,在海平面处  $g = 9.807 \text{ m/s}^2 = 980.7 \text{ cm/s}^2$ ,此数为标准重力加速度,工程上常取  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ 。

例 1-1 某流体重度为  $9200 \text{ N/m}^3$ ,此处位置的重力加速度为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。问此时该流体的密度是多少?若将此流体在不变温情况下移至较高处,该处的重力加速度仅为  $9.805 \text{ m/s}^2$ ,则它的重度和密度如何变化?

解: 据 (1.4) 式

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{9200}{9.81} = 937.8 \text{ (N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$$

即为  $937.8 \text{ kg/m}^3$ 。由于质量不变,体积不变,移动后只对重度有影响,故

$$\gamma = \rho g = 937.8 \times 9.805 = 9195 \text{ (N/m}^3)$$

## 第三节 流体的压缩性与膨胀性

### 一、压缩性

由于流体分子间间隙的存在,当它所受的压力增大时,其分子间距离缩短,体积减小(或者说密度增大),这种性质称为压缩性或体积弹性。具有压缩性的流体称为可压缩性流体,否则称为不可压缩的流体。

流体的可压缩性大小一般用压缩系数表示。设体积为  $V$  的流体,当压力增大  $dp$  时,体积减小了  $dV$ ,则当温度不变时,由单位压力所引起的体积相对变化量,称为压缩系数,用  $\beta$  表示,即

$$\beta = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1.5)$$

由于压力增大, 体积缩小, 所以  $dp$  与  $dV$  异号。为使压缩系数为正值, 所以在 (1.5) 式右边加一负号。

处于压缩状态下的流体, 有一种向外产生膨胀力的倾向, 这种力可以被看成是一种弹性力。流体弹性力的大小, 用体积弹性系数来表示。体积弹性系数是压缩系数的倒数, 用  $E_v$  表示, 即

$$E_v = \frac{1}{\beta} = -\frac{dp}{dV/V} \quad (1.6a)$$

若用比容  $v$  代替式中的体积  $V$ , 则有

$$E_v = -\frac{dp}{dv/v} \quad (1.6b)$$

由于  $\rho v = 1$ ,  $d(\rho v) = \rho dv + v d\rho = 0$ , 因此,  $-dv/v = d\rho/\rho$ , 代入上式, 得

$$E_v = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.6c)$$

$E_v$  的单位是  $N/m^2$ 。

流体的体积弹性系数  $E_v$  和固体材料的弹性模数  $E$  的意义相似, 单位也相同。显然  $E_v$  值愈大, 流体压缩性愈小, 愈不容易被压缩;  $E_v$  值愈小, 流体压缩性愈大, 愈容易被压缩。

水在各种压力下的压缩系数, 列于表 1—2 中。

表 1—2 水的压缩系数 ( $m^2/N$ )

| 压力(kPa) \ 温度(°C) \ $\beta$      | 0                       | 10                      | 20                      | 50                      |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $(0.101 \sim 2.50) \times 10^3$ | $5.180 \times 10^{-10}$ | $4.935 \times 10^{-10}$ | $4.844 \times 10^{-10}$ |                         |
| $(2.50 \sim 5.10) \times 10^3$  | $5.008 \times 10^{-10}$ | $4.854 \times 10^{-10}$ | $4.701 \times 10^{-10}$ |                         |
| $(5.10 \sim 7.60) \times 10^3$  | $5.027 \times 10^{-10}$ | $4.670 \times 10^{-10}$ | $4.497 \times 10^{-10}$ |                         |
| $(7.60 \sim 10.1) \times 10^3$  | $4.956 \times 10^{-10}$ | $4.640 \times 10^{-10}$ | $4.466 \times 10^{-10}$ |                         |
| $(1.01 \sim 5.10) \times 10^4$  | $4.691 \times 10^{-10}$ | $4.415 \times 10^{-10}$ | $4.283 \times 10^{-10}$ | $4.109 \times 10^{-10}$ |
| $(0.51 \sim 1.01) \times 10^5$  | $4.109 \times 10^{-10}$ | $3.895 \times 10^{-10}$ | $3.753 \times 10^{-10}$ | $3.610 \times 10^{-10}$ |
| $(1.01 \sim 1.52) \times 10^5$  | $3.528 \times 10^{-10}$ | $3.436 \times 10^{-10}$ | $3.334 \times 10^{-10}$ | $3.212 \times 10^{-10}$ |

在工程计算中, 水的弹性系数一般取  $E_v = 2.06 \times 10^9 (N/m^2)$ ; 液压油的平均弹性系数取  $E_v = (1.4 \sim 1.96) \times 10^9 (N/m^2)$ 。

## 二、膨 胀 性

流体随温度变化, 其体积相应地也发生变化, 在一定压力下, 流体体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。膨胀性的大小用体积膨胀系数  $\alpha$  来度量, 它表示增加一个单位

温度时所引起的体积相对增大量, 即

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} \quad (1/K \text{ 或 } 1/^\circ\text{C}) \quad (1.7)$$

式中,  $dT$  是流体的温度增量。

液体的体积膨胀系数很小, 一般可忽略不计。

水的膨胀系数列于表 1—3 中, 液压油的膨胀系数列于表 1—4 中。

表 1—3 水的膨胀系数 (1/K)

| 温度(K)<br>压力(kPa)    | 274~283               | 283~293               | 313~323               | 333~343               | 363~373               |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $0.981 \times 10^2$ | $0.14 \times 10^{-4}$ | $1.50 \times 10^{-4}$ | $4.22 \times 10^{-4}$ | $5.56 \times 10^{-4}$ | $7.19 \times 10^{-4}$ |
| $9.81 \times 10^2$  | $0.43 \times 10^{-4}$ | $1.65 \times 10^{-4}$ | $4.22 \times 10^{-4}$ | $5.48 \times 10^{-4}$ | $7.04 \times 10^{-4}$ |
| $1.96 \times 10^3$  | $0.72 \times 10^{-4}$ | $1.83 \times 10^{-4}$ | $4.26 \times 10^{-4}$ | $5.39 \times 10^{-4}$ |                       |

表 1—4 液压油的膨胀系数

| 重度 $\gamma$ (N/m <sup>3</sup> ) | 6 867.0              | 7 843.0              | 8 338.5              | 8 829.0              | 9 025.2              |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 膨胀系数 $\alpha$ (1/K)             | $8.2 \times 10^{-4}$ | $7.7 \times 10^{-4}$ | $7.2 \times 10^{-4}$ | $6.4 \times 10^{-4}$ | $6.0 \times 10^{-4}$ |

从表 1—3、1—4 可以看出, 水的膨胀系数很小, 在工程上一般可以忽略, 当温度较高时, 则要考虑。对于液压油, 则只认为与重度有关。

气体与液体显著不同, 气体不仅有明显的可压缩性, 而且具有较大的膨胀性, 压力和温度的变化对气体密度或重度的影响均较大。气体压强不变时, 温度升高 1 K, 体积便增大 273 K 时体积的 1/273, 因此, 气体的热膨胀系数为,

$$\alpha = 1/273 \quad (1.8)$$

例 1--2 图 1—1 为一鉴定压力表的校正器, 器内充满油液, 其  $\beta = 47.5 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$ , 由密封良好的活塞旋进压缩油液, 造成鉴定压力表所需的压力。活塞直径  $D=1 \text{ cm}$ , 螺距  $t=2 \text{ mm}$ , 在 1 个大气压下器内充油体积  $V=200 \text{ cm}^3$ 。当校正器需造成 200 个大气压的表压力时, 求手轮需旋进多少转?

解: 根据公式 (1.5) 可求出油液需减少的体积为:

$$dV = -\beta V dp$$

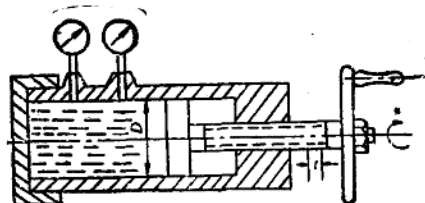


图 1—1 压力表校正器

手轮进  $n$  转时, 使油液减少的体积,

$$dV_1 = V_1 - V = -\frac{\pi}{4} D^2 t n$$

当  $dV_1 = dV$  时, 即造成  $dP$  压力。故有

$$\frac{\pi}{4} D^2 t n = \beta V dp$$

于是

$$n = \frac{4 \beta V dp}{\pi D^2 t} = \frac{4 \times 4.75 \times 10^{-6} \times 200 \times 200}{3.14 \times 1^2 \times 0.2} = 12.1 \text{ 转}$$

## 第四节 流体的粘性及内摩擦定律

### 一、流体的粘性

在流体的各种性质中, 对研究流体有重要作用的是粘性。那么什么是粘性呢? 先举一个例子来看一下表示空气粘性的实验。

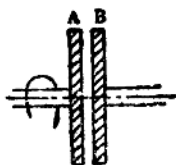


图 1-2 空气粘性实验转盘

如图 1-2 所示, 类似于摩擦离合器的两个圆盘  $A$  和  $B$ , 圆盘  $A$  由小马达带动旋转, 圆盘  $B$  与  $A$  隔开, 互不相连, 因此  $A$  盘旋转时,  $B$  盘不转动。当  $B$  盘逐渐靠近  $A$  盘时;  $B$  盘即跟着  $A$  盘作同向旋转, 但转速较低。  $A$ 、 $B$  盘没有直接接触(中间隔一层空气), 为什么  $B$  盘会跟着  $A$  盘旋转呢? 这是因为空气分子在不断的运动, 空气与圆盘平面有粘附作用

力。紧挨  $A$  盘的一层空气, 随  $A$  盘以同样速度转动, 沿法线向外, 一层带动一层, 气流速度逐渐降低, 直至把  $B$  盘带动起来, 但转速低于  $A$ 。由于  $A$ 、 $B$  之间各空气层的速度不相等, 在相邻流层的接触面上, 必然形成阻碍两流层相对运动的一对大小相等, 方向相反的内摩擦力, 流体的这种性质称为粘性, 单位面积上的内摩擦力称为内摩擦应力, 或称为粘性切应力, 用  $\tau$  表示。

这里需要指出, 流体处于静止的时候, 流体的粘性就不会表现出来, 在这一方面, 流体与固体不大相同。对静止固体, 必须作用以足够的力克服了它的摩擦力后, 才能开始运动。而流体则不然, 由于它没有静摩擦力, 只要在静止流体上稍加一点剪切力, 它就会开始流动。

粘性的产生, 可用流体内部分子之间的吸引力和分子扩散造成的动量交换来解释。对于液体的粘性主要是由分子之间的吸引力造成的, 液体静止时, 内部分子处于平衡位置, 这时相邻分子间引力和斥力平衡。当相邻层发生相对运动时, 分子间距有所增加, 这将使相邻分子间的斥力和引力均减小, 但是斥力减少的数量多于吸引力减少的数量, 因此综合结果表现为吸引力。于是快层分子因有此引力而拖动慢层, 而慢层分子则固有此引力而阻滞快层, 因

而形成了粘性。

对气体来讲,主要是由气体分子扩散造成的动量交换引起粘性。由于气体分子相距较远,并且作不规则的运动,在气体流动时各层之间有微观的分子扩散及掺混,于是原快层的分子扩散到慢层,就会把较多的动量交换给慢层,即给慢层以向前的碰撞,形成拖力使慢层加速。相反地,当原来在慢层的分子扩散到快层时,它原有的动量比快层中分子的动量小,将会给快层以向后的碰撞,形成阻力而使快层减速,因而,使气体产生粘性。

流体粘性大小,取决于流体本身的性质。同一种流体因所处状态不同,粘性也会有所变化。气体的粘性随温度升高而增大,而液体的粘性随温度的升高而降低,这是因为气体温度升高时,其分子的不规则运动加强,扩散掺混增加,因此,粘性增加,而液体在温度升高时,液体的内聚力逐渐减小,因此粘性减小。

## 二、牛顿内摩擦定律和粘性系数

牛顿在1687年提出流体内摩擦定律。如图1—3所示,在两块无限大平行平板之间充满流体,设下板固定不动,上板以给定速度 $v$ 运动,由于粘性流体将粘附于它所接触的固体表面,则紧靠下板的流体层的速度为零,其它流体层速度从下板的零变到上板 $v$ ,当二板距离不大时,两板之间速度为直线分布。

实验表明,当 $v$ 、 $y$ 不变时,拖动上板需要的力 $F$ 与接触面 $A$ 成正比, $F \propto A$ ;  $A$ 不变时, $F \propto v/y$ 。所以 $F \propto Av/y$ 。其中,比例系数与流体的性质有关。

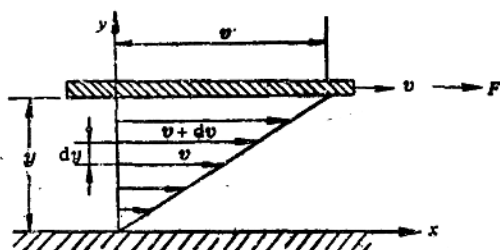


图1—3 流体内摩擦定律实验

牛顿内摩擦定律的数学表达式:

$$F = \pm \mu A dv/dy \text{ 或 } \tau = \pm \mu dv/dy \quad (1.9)$$

式中, $\mu$ 为表示粘性大小的比例系数,称为动力粘度或简称为粘度; $dv/dy$ 称为速度梯度,当各流体层速度呈直线分布时, $dv/dy = v/y$ 为常数。

“ $\pm$ ”号是为了确保 $F$ 或 $\tau$ 为正值而加上的。

动力粘度的单位为 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ,目前,也采用泊(P)或厘泊(cP),换算关系如下:

$$1 \text{ P} = 100 \text{ cP} = 0.1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$$

水在 $20.2^\circ\text{C}$ 时粘度恰好为 $1 \text{ cP}$ ,因此,厘泊表示的流体粘度值,就是相当于 $20.2^\circ\text{C}$ 水的粘度值的倍数。

在流体力学中经常用动力粘度 $\mu$ 和密度 $\rho$ 的比值表示粘性的大小,这个比值用 $\nu$ 表示,称为运动粘度,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.10)$$

$\nu$ 的单位是 $\text{m}^2/\text{s}$ ,常用 $\text{cm}^2/\text{s}$ 称为斯托克斯,简称为斯。

另一种表示液体粘度的方法用恩氏粘度,用符号 $^\circ\text{E}$ 表示。恩氏粘度是一种相对粘度,它是指 $200 \text{ mL}$ 液体,从恩氏粘度计中流出所需的时间 $t_1(\text{s})$ 与同量的 $20^\circ\text{C}$ 的蒸馏水从同一恩氏粘度计中流出的时间 $t_2(\text{s})$ (约 $50 \text{ s}$ )之比,即

$$^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1.11)$$

恩氏粘度是无因次纯数，当 $^{\circ}E > 2$ 时，它与运动粘度 $\nu$ 的换算关系有以下的经验公式：

$$\nu = 0.0731^{\circ}E - \frac{0.0631}{^{\circ}E} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (1.12)$$

表 1—5 列出几种流体的 $\mu$ ， $\nu$ 值。

剪切应力与速度梯度的关系符合牛顿内摩擦定律的流体，称为牛顿流体，如水、空气和机油等。不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。

表 1—5 几种流体的 $\mu$ 、 $\nu$ 值（在一个标准大气压下）

| 流体种类 | 温 度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 动力粘性系数 $10^6 \cdot \mu$<br>( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ) | 运动粘性系数 $10^6 \cdot \nu$<br>( $\text{m}^2/\text{s}$ ) |
|------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 水    | 0                             | 1 792                                                               | 1.792                                                |
|      | 15                            | 1 138                                                               | 1.141                                                |
|      | 20                            | 1 005                                                               | 1.007                                                |
|      | 100                           | 284                                                                 | 0.296                                                |
| 空 气  | 0                             | 17.25                                                               | 13.33                                                |
|      | 20                            | 18.20                                                               | 15.12                                                |
|      | 100                           | 21.75                                                               | 23.00                                                |

### 三、理想流体与实际流体

实际流体都是具有粘性的，因此在流体运动时均产生内摩擦力，考虑内摩擦力来研究流体运动的规律是极为复杂的。所以为便于理论分析，流体力学中提出了非粘性流体的概念。所谓非粘性流体就是忽略了粘滞性的流体，也称做理想流体。而把具有粘滞性的流体称为粘性流体或称为实际流体。

研究没有粘性的流体运动可以使问题大大简化，容易得出流体运动的基本规律。对于有些粘性不起主要作用的问题，有些规律可直接运用。有些必须考虑粘性的问题，如流动阻力，则可专门对粘性的作用进行分析或实验研究，然后对上述的结果进行修正或补充，使实际问题得到解决。

## 第五节 表面张力和毛细现象

### 一、表 面 张 力

静止液体中每个分子都受到周围分子的吸引力作用，而且从周围各个方向等值地作用于任意分子，因此它们的影响互相抵消，使液体处于平衡。但是在液体表面情形则不同，在液

体表层中，每个分子都要受到一个垂直液面而指向液体内部的不平衡力，在这种力的作用下，液体表面层的分子有尽量挤入内部的趋势，因此液体量尽量缩小表面积，其表面就好像是一层弹性膜。沿着液体表面，使表面有收缩倾向的力称液体的表面张力。

表面张力的大小用液体自由表面的单位线性长度上的作用力表示。即用表面张力系数 $\sigma$ 表示， $\sigma$ 单位是N/m。表1—6列出几种流体的 $\sigma$ 值。

表 1—6 几种流体的 $\sigma$ 值

| 液体种类 | 相接触介质 | 温度 (°C) | $\sigma$ (N/m) |
|------|-------|---------|----------------|
| 水    | 空气    | 20      | 0.0728         |
| 苯    | 空气    | 20      | 0.0289         |
| 肥皂液  | 空气    | 20      | 0.025          |
| 水 银  | 空气    | 20      | 0.465          |
| 水 银  | 水     | 20      | 0.38           |
| 定子油  | 空气    | 20      | 0.0317         |
| 甘 油  | 空气    | 20      | 0.0223         |
| 四氯化碳 | 空气    | 20      | 0.0268         |
| 橄榄油  | 空气    | 20      | 0.032          |
| 乙 醚  | 空气    | 20      | 0.0168         |
| 乙 醚  | 水     | 20      | 0.0099         |

## 二、润 湿 现 象

在液体和气体或者液体和固体两种不相混合的介质间，其分界面处附近的分子都将受到各自内部分子力的吸引，分子界面的形状取决于邻接的两种介质的性质。

当水滴落在玻璃板上会立即扩散开，在玻璃板上附着一层水，这种现象称为润湿现象。水银落在玻璃板上不会扩展而成为小球状，这种现象称为不润湿现象。水对玻璃是润湿流体，而水银对玻璃是不润湿流体。

当液体内分子间吸引力大于液体和固体间的附着力时，液体就会紧缩自己的体积，而不与固体发生润湿；而当液体间分子吸引力小于液体与固体间附着力时，液体就会对固体表面发生润湿，见图1—4、1—5。

对于能润湿固体的液体，接触角（在液体和固体接触处，液体表面的切面和固体表面所成的角）是锐角（ $\theta < 90^\circ$ ）；对于不能润湿固体的液体，接触角是钝角（ $\theta > 90^\circ$ ）。水与玻璃的接触角约为 $8.5^\circ$ ，水银与玻璃的接触角约为 $140^\circ$ 。

在圆形容器里的液体，能润湿固体的液体表面成凹形，不能润湿固体的液体表面成凸形，如图1—4、1—5所示。



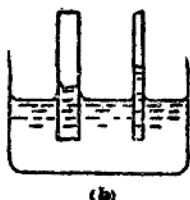


图 1-4 润湿液体的凹形自由表面

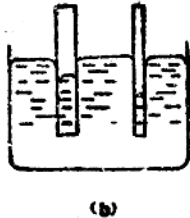
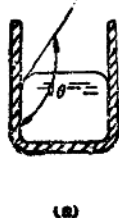


图 1-5 不润湿液体的凸形表面

### 三、毛细现象

当容器内装入润湿液体时，贴器壁的液体表面会沿壁而向上弯曲；当装入不润湿的液体时，液面将向下弯曲。在液体里插入一根细管，管内外液面会产生高度差，对于润湿液体，管内液面升高；对于不润湿液体管内液面下降。这种现象称为毛细现象，所用细管称为毛细管。图 1-6 所示是毛细管内液面上升的情况。

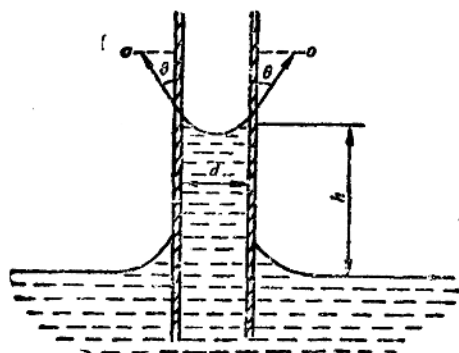


图 1-6 毛细管液面上升

若液体与器壁接触角为  $\theta$ ，则在平衡状态下，应有如下关系：

$$\sigma \cos \theta \pi d = \rho \frac{\pi d^3}{4} h g$$

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1.13)$$

式中。  $\sigma$ ——液体表面张力系数 (N/m)；

$\theta$ ——接触角 ( $^\circ$ )；

$\rho$ ——液体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；

$g$ ——重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )；

$d$ ——毛细管内径 (m)。

如  $\theta > 90^\circ$ ， $h$  为负，表示管内液面下降，

说明液体为不润湿液体。根据毛细现象，设计制造了测量油粘性的粘度计。另外，在测量压力和液位时，由于毛细现象将产生一定误差，测量时要引起注意，并且对测管直径有一定要求。单管差压计精密测量时，介质为水，则管内径不得小于 15 mm；如果介质为水银，则管内径不得小于 20 mm。

## 第六节 液体的蒸发与沸腾、气体的溶解

### 一、液体的蒸发与沸腾

液体表面的汽化现象称做蒸发，而沸腾则是在液体表面和液体内部同时发生汽化现象。对于液体来说，它的饱和汽压等于外界压强时才能沸腾。在外界是一个标准大气压强时，水在  $100^\circ\text{C}$  时沸腾。液体沸腾时的温度称沸点。外部压强改变时，液体的沸点也改变。在外部