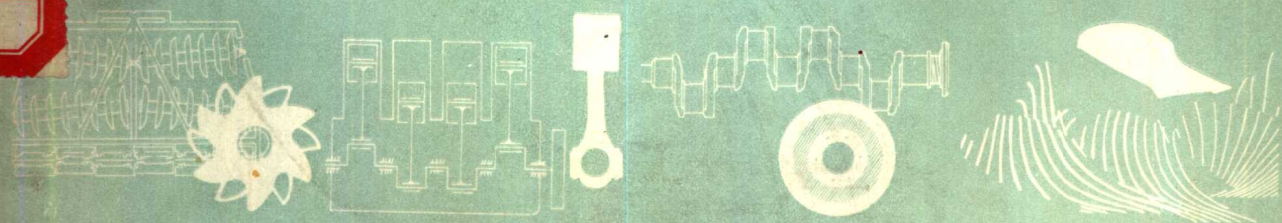


高等院校试用教材

# 流体力学和流体机械

王焕德 主编

中国农业机械出版社



高等院校试用教材

# 流体力学和流体机械

吉林工业大学 王焕德主编

中国农业机械出版社

## 编者的话

本书是以高等工科院校的机械制造类型专业的教学要求为主编写的。内容以流体平衡和运动的基础理论为重点，并讲述了管中流动，渠道均匀流动，孔流和缝隙流动等的水力计算；流体机械部分主要讲述水泵的工作原理外，介绍了农用水泵的结构和选用以及容积式液压传动用泵等。简略介绍了通风机的基本知识。

全书适于50~60学时教学使用。亦可供有关的技术人员参考。

这本教材是根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会的精神和会议所确定的教材编写计划，由吉林工业大学王焕德主编。书中的第六章和第十章分别由田曼琦和高承志执笔。

全书由罗邦杰教授主审，吴玉书同志参加审阅并编写了第二、七章中的例题；在编写中曾得到凌玉英同志的帮助。一并致谢！

由于编者理论水平所限，实践知识不够，书中欠妥和错误之处恳切期望读者批评指正。

编者

一九八〇年十月

# 目 录

第一章 绪论	1	§ 4-2 流体运动阻力和能量损失的类型	88
§ 1-1 流体的特征	1	§ 4-3 均匀流动基本方程	88
§ 1-2 连续介质的概念	2	§ 4-4 圆管中层流流动	90
§ 1-3 流体的主要物理性质	2	§ 4-5 层流起始段	95
§ 1-4 作用在流体上的力	15	§ 4-6 紊流运动概述	96
§ 1-5 理想流体和实际流体	16	§ 4-7 紊流运动的摩擦阻力	99
思考题和习题	17	§ 4-8 紊流过流断面上的速度分布规律	101
第二章 流体静力学	18	§ 4-9 紊流沿程损失的计算	103
§ 2-1 流体静压力及其特性	18	§ 4-10 局部阻力水头损失和等值长度	109
§ 2-2 流体的平衡微分方程	20	§ 4-11 过流断面变化引起的局部损失	110
§ 2-3 流体静力学基本方程	22	§ 4-12 管流流动方向改变和管路中各种部件的局部阻力系数	116
§ 2-4 压力的名称、单位和测压计	24	§ 4-13 局部阻力系数与雷诺数的关系	121
§ 2-5 流体静压力的图示法	28	§ 4-14 局部阻力的互相影响及减少局部损失的措施	123
§ 2-6 帕斯卡定理	30	思考题和习题	124
§ 2-7 作用于平面上的液体总压力	31	第五章 管路、孔口和管嘴的水力计算	127
§ 2-8 作用于曲面上的液体总压力	34	§ 5-1 管路水力计算概述	127
§ 2-9 物体在液体中的潜浮原理	37	§ 5-2 短管的水力计算	128
§ 2-10 相对静止的液体	40	§ 5-3 长管的水力计算	131
思考题和习题	44	§ 5-4 虹吸管的计算	136
第三章 流体运动学与动力学基础	49	§ 5-5 非圆形管路的沿程损失计算	138
§ 3-1 流体运动的基本概念	49	§ 5-6 管路的时效问题	140
§ 3-2 流体的连续流动原理	54	§ 5-7 水击	141
§ 3-3 理想流体的运动微分方程	57	§ 5-8 孔口出流概述	146
§ 3-4 理想流体微元流束的能量方程	58	§ 5-9 薄壁小孔口的稳定出流	148
§ 3-5 实际流体总流的能量方程	63	§ 5-10 管嘴出流概述	152
§ 3-6 实际流体的运动微分方程	69	§ 5-11 管嘴的水力计算	154
§ 3-7 流体不稳定流动的能量方程	72	§ 5-12 孔口和管嘴的不稳定出流	159
§ 3-8 流体稳定流动的动量方程	73	§ 5-13 流速的测量	160
§ 3-9 流体微团运动的分解	74	§ 5-14 流量的测量和管式流量计	162
§ 3-10 涡线和涡管	78	习题	167
§ 3-11 速度环量和斯托克斯定理	79	第六章 液体在缝隙中的流动	170
§ 3-12 速度势函数和等势面	81	§ 6-1 液体在平行平面缝隙中的流动	170
思考题和习题	82		
第四章 流体运动的阻力和能量损失	84		
§ 4-1 流体运动的两种状态	84		

§ 6-2	液体在有相对运动的平行平面 缝隙中的流动	172	§ 9-2	流体在叶轮内的运动分解	220
§ 6-3	液体在环状缝隙中的流动	174	§ 9-3	叶片式泵和通风机的基本方程	224
§ 6-4	液体在两倾斜平面间楔形缝隙 中的流动	176	§ 9-4	泵和通风机的损失和效率	228
§ 6-5	液体在环状楔形缝隙中的流动	178	§ 9-5	相似定律和比转数	231
§ 6-6	液体在平行平面缝隙中的径向 流动	180	§ 9-6	泵内的汽蚀	235
§ 6-7	液体在圆锥环状缝隙中的流动	183	§ 9-7	泵内的径向力和轴向力	240
	习题	184	§ 9-8	叶片式泵和通风机的特性曲线	244
<b>第七章</b>	<b>无压流动和射流的冲击     作用</b>	<b>186</b>	§ 9-9	运行工况点和工况调节	248
§ 7-1	渠道中液体均匀流动概述	186	§ 9-10	泵的联合工作	251
§ 7-2	渠道均匀流动的水力计算	188	§ 9-11	水泵的选择	253
§ 7-3	渠道的水力最优断面	189	§ 9-12	水泵的起停注水和防止倒流的 措施	254
§ 7-4	渠道中的最大和最小允许速度	191	<b>第十章</b>	<b>容积式泵</b>	<b>256</b>
§ 7-5	水堰	193	§ 10-1	往复泵	256
§ 7-6	射流对固体壁面的作用力	196	§ 10-2	齿轮泵	264
§ 7-7	自由射流概述	201	§ 10-3	容积式叶片泵	270
	习题	204	§ 10-4	轴向柱塞泵和径向柱塞泵	274
<b>第八章</b>	<b>流体机械概述</b>	<b>206</b>	§ 10-5	螺杆泵	280
§ 8-1	流体机械的定义和类型	206	<b>第十一章</b>	<b>井泵、自吸式离心泵、水轮     泵、液环真空泵、射流泵</b>	<b>281</b>
§ 8-2	水泵和通风机的性能参数	207	§ 11-1	井泵	281
<b>第九章</b>	<b>叶片式泵和通风机</b>	<b>214</b>	§ 11-2	自吸式离心泵	285
§ 9-1	叶片式水泵和通风机的构造和 工作原理	214	§ 11-3	水轮泵	288
			§ 11-4	液环真空泵	293
			§ 11-5	射流泵	294

# 第一章 绪 论

流体力学是工程应用力学的组成部分之一。它采用理论分析与实验相结合的方法研究流体(水、油液、气体及合成流体)平衡和运动的规律,建立起流体中的作用力、运动速度和压力之间的关系,并以所得规律解决工程实践中的各种问题。

在理论研究方面,流体力学广泛采用物理学和理论力学的基本定律,以连续函数这一数学工具探讨流体的各种规律。因为流体在平衡和运动状态的许多现象相当复杂,难以得到精确解答。为使研究工作简化,还能得到较为可靠的近似解,所以采用理想化的条件下进行研究,这也为应用数学分析方法提供了方便。同时,为弥补理论分析的不足,广泛使用各种实验方法取得测量结果,进行归纳找出经验或半经验性规律,以便在工程实践中加以利用。

流体力学是许多工程技术领域的理论基础。例如,在输水和输油管道,水泵,通风机,农田灌溉,液压及液力传动,石油炼制等部门从事设计、制造及技术管理的工程技术人员都需要掌握流体力学的理论知识。

## § 1-1 流体的特征

流体内分子间的内聚力比较微弱,所以流体与固体相比,流体的显著特征是具有很大的流动性,不能抵抗拉伸力和剪切力的作用,只能抵抗对它的压缩力作用。因而,只要流体有运动和变形的可能性,甚至在自身重量的作用下流体都会发生变形或流动。但是,自然界中存在的流体都具有一定的粘性,因而其流动性也要受到自身具有的粘性约束,不会是无限制的流动。

流体包括液体和气体,它们之间的区别在于:

### 1. 自由表面

液体有自由表面,气体无自由表面。

### 2. 体积的大小和形状

液体具有一定的体积,其形状被所在容器的轮廓所限定。在一般情况下,液体被看作是**不可压缩的流体**。只有在水击过程等特殊情况下才必须考虑液体的压缩性,否则不能正确阐述问题的物理实质。

气体可以充满其所占有的全部空间,无明显的外廓形状。通常,气体被认为是可压缩的流体。但是在一定的变化过程中,如果密度可看作是不变值,那么气体可当作不可压缩的流体对待。例如,空气的运动速度大于100米/秒以上时,则要考虑压缩性的影响。而在50~70米/秒以下时,就可将空气当作不可压缩流体看待。这时,液体的运动规律也同样适用于气体。

### 3. 粘性

与气体相比较,液体的粘性较大,并且随温度的升高而降低。而气体的粘性,则随温度的升高而增大。

## § 1-2 连续介质的概念

流体是由作连续无规则运动的大量分子组成的，而每一分子中至少包括两个以上的原子。在分子之间和原子之间均有一定的间隙，所以流体是一种内部有空隙的不连续的物质形态。为了避免研究流体平衡与运动规律的困难性，在流体力学中不去研究单个分子或原子的运动状态，而是从宏观角度研究分子团的运动。这种分子团称作流体质点或微团。并且认为质点在流体内部是一个紧邻一个排列的，即流体内的质点之间无任何间隙，是一个连续体，叫作连续介质。这样，流体力学就完全避开了研究分子间的作用关系，而是将流体模拟成连续介质，从宏观角度探讨质点的平衡、运动及与边界之间的互相作用的科学。这种模拟法只在与分子运动无直接关系的情况下，是完全可行的，而且研究得的结果也是正确的。但是，对于一些与分子运动有密切关系的物理现象就不能充分表达出问题的实质了，这种情况就超越了流体力学的研究范畴。

引用连续介质这一概念还有一个重要含义，就是可以把流体无限分割成数学上的点，而每个点仍然保留流体所具有的物理性质。当流体质点是连续布满其所在的空间时，在研究静止和运动规律过程中，就可以采用连续函数这一数学工具，以使用数学式描绘出流体的各种状态。

综上所述，连续介质的特性：①流体可以无限分割成无数个质点并不改变物理性质；②具有严密的连续性，也就是说介质的重度、密度、应力、温度等各种物理量只能是连续的变化，可以视为坐标的连续函数。

## § 1-3 流体的主要物理性质

### 一、密度和重度

密度是表示流体具有质量特性的物理量。单位体积流体所具有的质量称为密度，用  $\rho$  来表示。

如图 1-1 所示，假定均质流体的体积为  $V$  (米<sup>3</sup>)，其所含有的质量是  $M$  (公斤)，则密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{公斤/米}^3) \quad (1-1)$$

根据牛顿第二定律，质量等于以牛顿为单位的物体重量  $G$  与以米/秒<sup>2</sup> 为单位的重力加速度  $g$  的比值，

即

$$M = \frac{G}{g}$$

所以

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{G}{gV} \quad (1-2)$$

重度是表示流体具有重量特性的物理量。单位体积流体具有的重量称为重度，用  $\gamma$  表示，即

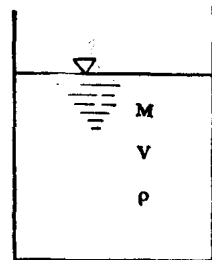


图 1-1 均质流体

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{牛顿/米}^3) \quad (1-3)$$

将上式代入式(1-2), 可得

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\gamma}{g} \\ \gamma &= \rho g \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

或

需要说明的是, 流体的密度和重度是随温度的变化而改变的。

在一个标准大气压下, 当蒸馏水在温度为 4 °C 时密度和重度具有最大值:  $\rho = 1020$  公斤/米<sup>3</sup>;  $\gamma = 9810$  牛顿/米<sup>3</sup>。但是当温度变化时, 水的  $\rho$  和  $\gamma$  变化都很小。因此, 在一般工程计算中, 除需要做精确计算以外, 可用蒸馏水的密度和重度作为普通水的计算值。

在工程上经常遇到“比重”这一术语, 它是某种流体的重量与相同体积蒸馏水在 4 °C 时重量的比值。因此, 比重是无因次数值, 而重度是有因次数值。后者还要看  $\gamma$  的单位(牛顿/米<sup>3</sup>, 达因/厘米<sup>3</sup>, 牛顿/厘米<sup>3</sup>)而定, 它们的概念不能混淆。如水银的重度  $\gamma_{\text{Hg}} = 133416$  牛顿/米<sup>3</sup> =  $13.3416 \times 10^3$  达因/厘米<sup>3</sup>; 4 °C 蒸馏水的重度  $\gamma = 9810$  牛顿/米<sup>3</sup> = 981 达因/厘米<sup>3</sup>, 则水银的比重  $S_{\text{Hg}} = \frac{\gamma_{\text{Hg}}}{\gamma} = 13.6$ 。

表 1-1 中列出某些流体的重度。表 1-2 中列出水在不同温度时的重度。表 1-3 列出空气在不同温度时的重度。

表 1-1 某些流体在 15 °C 时的重度和粘度(在 1 个标准大气压下)

流 体 名 称	重 度 $\gamma$ (牛顿/米 <sup>3</sup> )	运 动 粘 度 $\nu$ (厘米 <sup>2</sup> /秒)
汽 油	6674~7063	0.0060~0.0065
酒 精	7750	0.013~0.017
煤 油	7750~8044	0.020~0.025
甘 油	12361	8.70~11.60
石 油	8437	0.070~0.080

表 1-2 水在不同温度时的重度和粘度(在 1 个标准大气压下)

温 度 $t$ (°C)	重 度 $\gamma$ (牛顿/米 <sup>3</sup> )	运 动 粘 度 $\nu$ (厘米 <sup>2</sup> /秒)
0	9808.63	0.0179
10	9807.23	0.0130
15	9801.37	0.0114
20	9694.54	0.0100
30	9764.58	0.0080
40	9733.87	0.0066
60	9645.58	0.0047
80	9532.05	0.0036
100	9401.71	0.0029

### 例题 1-1

求在一个标准大气压下, 4 °C 时体积为 1 升的水的重量和质量各为若干?

解: 体积  $V = 1$  升 = 0.001 米<sup>3</sup>。



表 1-3 空气在不同温度时的重度和粘度(在 1 个标准大气压下)

温度 t (°C)	重度 $\gamma$ (牛顿/米 <sup>3</sup> )	运动粘度 $\nu$ (厘米 <sup>2</sup> /秒)
0	11.684	0.137
10	12.232	0.147
15	12.027	0.152
20	11.821	0.157
30	11.449	0.166
40	10.066	0.176
60	9.810	0.196

在一个标准大气压和 4°C 时, 水的重度  $\gamma = 9810$  牛顿/米<sup>3</sup>

而

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

$$G = \gamma V = 9810 \times 0.001 = 9.81 \text{ 牛顿}$$

又知

$$\rho = \frac{M}{V}$$

所以

$$M = \rho V = 1020 \times 0.001 = 1.02 \text{ 公斤}$$

## 二、压缩性和膨胀性

液体和气体的这两种物理性质有很大的不同, 下面要分别加以介绍。

### 1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的体积随所受压力增加而减小的性质称为压缩性。体积变小的程度用体积压缩系数  $\beta_p$  表示。

体积压缩系数  $\beta_p$  是在温度不变的条件下, 增大一个单位压力时, 液体体积的相对改变值。

如以  $dp$  表示压力变化值,  $\frac{dV}{V}$  表示体积相对改变值,  $V$  是原来的体积, 则体积压缩系数可写为

$$\beta_p = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-5)$$

式中的“-”号是压力增加时, 体积减小, 为使  $\beta_p$  为正值, 故加“-”号。体积压缩系数的倒数, 称为体积弹性系数  $E_0$ , 即

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (1-6)$$

在国际单位制中, 体积压缩系数  $\beta_p$  的单位是米<sup>2</sup>/牛顿。换算关系是

1 米<sup>2</sup>/牛顿 = 9.81 米<sup>2</sup>/公斤力; 1 米<sup>2</sup>/公斤力 = 0.102 米<sup>2</sup>/牛顿。

体积弹性系数  $E_0$  的单位是牛顿/米<sup>2</sup>。

液体对于压缩的抵抗能力很强, 因而可以承受很大的压力。以水为例, 在温度为 0~20°C, 压力由 1 增大到 500 个大气压时, 体积只比初始值减小  $\frac{1}{20000}$ 。所以在工程上可以认为液体是不可压缩的, 压缩性可以不考虑, 但是在一些特殊问题(如水击现象)中, 仍必须考虑。否

则液体的压缩性所引起的影响，将会造成很大的偏差。

液体的体积随温度的升高而膨胀的性质称为液体的膨胀性，用体积膨胀系数  $\beta_t$  表示。

体积膨胀系数  $\beta_t$  是在压力不变情况下，温度升高  $1^\circ\text{C}$  时液体体积的相对变化值，即

$$\beta_t = \frac{\frac{dV}{V}}{dt} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad (1-7)$$

液体的  $\beta_t$  值也是很小的。以水为例，在一个标准大气压下，温度为  $40\sim 50^\circ\text{C}$  时， $\beta_t = 422 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。

但是， $\beta_t$  也与压力有关。不过其变化甚微。对于多数液体而言， $\beta_t$  随压力的升高而略有减小。但是对于水而言，随着压力升高  $\beta_t$  确略有增加。表 1-4 列出在不同压力下水的温度膨胀系数。

表 1-5 列举出一些液体的体积膨胀系数。

表 1-4 水在不同压力下的  $\beta_t$

压 力 (标准大气压)	温 度 $t^\circ\text{C}$		
	1~10	10~20	40~50
	$\beta_t \quad (1/^\circ\text{C})$		
1	$14 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$
100	$43 \times 10^{-6}$	$165 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$
200	$72 \times 10^{-6}$	$183 \times 10^{-6}$	$426 \times 10^{-6}$
500	$149 \times 10^{-6}$	$236 \times 10^{-6}$	$429 \times 10^{-6}$

表 1-5 一些液体的  $\beta_t$  (平均值)

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

液体的  $\beta_t$  值是很小的。当压力及温度变化不大时，可以认为液体的体积不发生变化，既不可压缩又不膨胀的流体。因此，可以认为液体的重度  $\gamma$  及密度  $\rho$  是不随温度和压力而改变的。只有在压力及温度变化很大时，才必须考虑液体的压缩性及膨胀性，否则会产生较大的误差。甚而导致错误。

### 例题 1-2

如图 1-2 所示，为鉴定压力表用的校正器。校正器内充满油液，其体积压缩系数  $\beta_p = 0.0000475$  厘米<sup>2</sup>/公斤力。由拧入油缸内密封性能良好的柱塞造成所需要的压力。柱塞直径  $d = 1$  厘米。假设螺距  $t = 2$  毫米。在一个大气压力之下，校正器内油的体积  $V = 200$  厘米<sup>3</sup>。试问为了造成 50 个大气压力时，手轮需要扭转的转数  $n$  为若干？

解：根据公式(1-5)求出缸内油液需要减小的体积为

$$dV = \beta_p V dp$$

原来公式中的负号是代表压力增加，体积减小的意思，这里可以略去。

另外，减小的体积与手轮转数  $n$  之间的关系为

$$dV = \frac{\pi}{4} d^2 t n$$

上两式等号右侧应相等，于是

$$\beta_p V dp = \frac{\pi}{4} d^2 t n$$

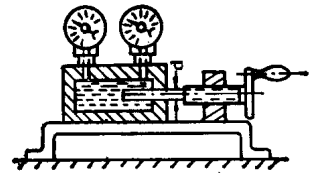


图 1-2

故所求的转数

$$n = \frac{4\beta_p V dp}{\pi d^2 t} = \frac{4 \times 0.0000475 \times 200 \times 50}{\pi \times 1^2 \times 0.2} \approx 3 \text{ 转}$$

### 例题 1-3

当锅炉内水温在  $t_1 = 70^\circ\text{C}$  时, 注入 50 立方米的水。问当锅炉内水温升到  $t_2 = 90^\circ\text{C}$  时, 能从锅炉排送出的水量为多少? 水的膨胀系数  $\beta_t = 0.00064 \text{ 1}/^\circ\text{C}$ 。

解: 从公式(1-7)可知:

$$dV = \beta_t V dt = 0.00064 \times 50 \times 20 = 0.64 \text{ 米}^3$$

故排送出的水量

$$V_2 = V_1 + dV = 50.64 \text{ 米}^3$$

## 2. 气体的压缩性和膨胀性

气体和液体不一样, 温度和压力的改变都将引起气体体积发生很大的变化。即气体具有很大的压缩性和膨胀性。换言之, 当压力和温度改变时, 气体的重度和密度要随之发生显著的变化。其变化规律可以用理想气体的状态方程即所谓的克拉贝隆-门捷列也夫方程来阐明。

$$pV = GRT \quad (1-8)$$

式中  $p$  —— 绝对压力(牛顿/米<sup>2</sup>);

$V$  —— 气体的容积(米<sup>3</sup>);

$G$  —— 气体的重量(牛顿);

$T$  —— 绝对温度 $^\circ\text{K}$ ,  $T = 273 + t^\circ\text{C}$ ;

$R$  —— 气体常数, 米<sup>3</sup>/ $^\circ\text{K}$ (某些气体的  $R$  列于表 1-6 中)。

表 1-6 某些气体的气体常数

气 体	空 气	氮	氧	氩	甲 烷	CO <sub>2</sub>	水蒸气	SO <sub>2</sub>
R 米 <sup>3</sup> / $^\circ\text{K}$	29.27	30.26	212	420.6	50.90	19.27	47.1	13.24

公式(1-8)可改写成

$$\frac{p}{\gamma} = RT \quad (1-9)$$

式中  $\gamma$  —— 气体的重度。

从式(1-8)和(1-9)可以看出  $\gamma$  或  $\rho = \gamma/g$  都是  $p$  和  $T$  的函数。因此, 气体是可压缩和能膨胀的流体。

由方程(1-9)可知, 当理想气体的压力从  $p_0$  变化到  $p_1$ , 温度从  $T_0$  变到  $T_1$  时, 其重度  $\gamma$  和密度  $\rho$  的变化可用下式计算

$$\gamma_1 = \gamma_0 \frac{p_1 T_0}{p_0 T_1} \quad (1-10)$$

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{p_1 T_0}{p_0 T_1} \quad (1-11)$$

虽然气体是可压缩和可膨胀的流体, 但是当气体在低速流动时, 它的密度和重度的变化值却很小, 可以忽略不计, 即可当作不可压缩的流体来看待。这时, 液体的运动规律对气体

也完全适用。不过，当气流速度较大，接近或大于音速时，气流的运动规律就与液体情况完全不同，而须另加考虑。

### 三、粘性

粘性是流体具有的一个重要的物理性质。

粘性的定义：当流体运动时，在其内部产生内摩擦力的性质称为粘性。

液体是由分子组成的物质。当它以某一速度流动时，其内部分子之间存在着吸引力。此外，流体的分子和固体壁面之间有附着力作用。分子间的吸引力和流体分子与壁面的附着力都属于抵抗流体运动的阻力，而且是以内摩擦力的形式表现出来，这就是流体粘性的实质。

液体和气体都有粘性，但程度不一样，在相同条件下，液体的粘性比气体的大。

在本课程里，我们不更多地讨论流体分子运动对粘性的影响，而将采取宏观的方法去分析液体的粘性问题的。

例如以中间充满液体的两块很长的平板进行实验(图1-3)。上平板的运动速度为  $u_0$ ，下平板固定不动，即  $u = 0$ 。两板的间距为  $h$ 。因为液体分子与板面间有附着力作用，所以与上平板表面接触的一层液体要以  $u_0$  速度和上平板一同向前运动，而与下板面接触的液层的速度则为零。当  $h$  很小时在两板间的液体将以接近于线性规律分布的速度向前流动，可表示为

$$u = \frac{y}{h} u_0 \quad (1-12)$$

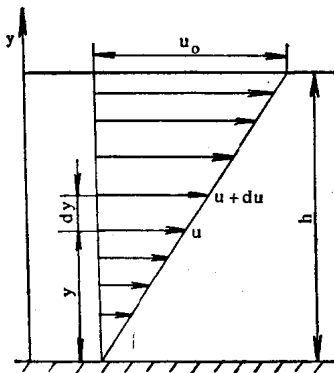


图 1-3 平板间粘性流体的运动

我们可把两平板间的液体看作许多无限薄的液体层在运动(图1-4)。当快速液层在慢速液层上滑过时，在两层接触面上必然产生剪切作用力，此即为粘性内摩擦力。因为任何形式的摩擦都要消耗能量，所以在粘性流体运动时

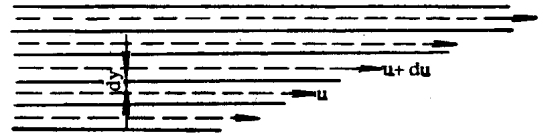


图 1-4 液层间相对运动

也必然要耗损一部分流体所具有的能量，而这部分能量，将转化为不能被利用或不能回收的热量而散失掉。在流体运动中，这种内摩擦力作为运动阻力的形式呈现出来，从而构成了流体力学中研讨的一项很重要的任务。

#### 1. 牛顿内摩擦定律

牛顿于 1689 年根据流体层状流动的现象提出了流体运动内摩擦定律假说，后来为理论分析和实验研究所证实。

根据大量实验结果得知，流层间内摩擦力  $T$  与以下几个因素有关：

1) 内摩擦力  $T$  与流体的粘性成正比关系。如用粘度  $\mu$  表示粘性的大小，则内摩擦力  $T$  和粘度  $\mu$  成正比关系；

2) 内摩擦力  $T$  与流体两层之间的接触面积  $A$  成正比；

3) 内摩擦力  $T$  与流体层间的速度梯度  $\frac{du}{dy}$  成正比。 $dy$  表示无限薄流体层的厚度, 其下表面的速度为  $u$ , 上表面的速度为  $u + du$ ,  $du$  是  $dy$  距离内的速度增量;

4) 内摩擦力  $T$  与压力无关

若上述诸因素的关系以数学式表示, 则可写为

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

以面积  $A$  除上式两端, 则得

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中  $\tau$  —— 单位面积上的内摩擦力, 即剪切应力。

公式(1-13)和(1-14)就是流体内摩擦定律的数学表达式。

式中的正负号是为了  $T$  或  $\tau$  保持正值而记入的, 当  $\frac{du}{dy}$  为正时用“+”号, 当  $\frac{du}{dy}$  为负时用“-”号。

利用公式(1-14)只能求出内摩擦力的大小。至于  $T$  与  $\tau$  的方向, 则可按下述原则确定。

对于流动慢的一层流体,  $\tau$  的方向与流速方向一致; 对于流动快的一层,  $\tau$  的方向则与流速方向相反。即,  $\tau$  是阻碍两层流体间相对运动的阻力。

从  $\tau$  的计算式可知, 在静止流体中:  $\frac{du}{dy} = 0$ , 故  $\tau = 0$ 。换言之, 在静止流体中并不呈现粘性。

表征流体粘性的粘度  $\mu$  可从式(1-14)得出

$$\mu = \pm \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-15)$$

$\mu$  的物理意义是两层流体间的速度梯度  $\frac{du}{dy} = 1$  时所产生剪切应力, 即

$$\mu = \tau \quad (1-16)$$

粘度也叫做粘性系数。

## 2. 流体粘度的表示方法

### 1) 动态粘度

动态粘度也叫作绝对粘度或粘性动力系数。

在国际单位制中, 动态粘度用符号  $\mu$  或  $\eta$  表示。其单位: 帕·秒(Pa·s)或  $\frac{\text{牛顿} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$ (Ns/m<sup>2</sup>)。

1 帕·秒是指某一种均质流体在层状流动时的动态粘度, 在该流体内两个相距 1 米的平面以 1 米/秒的速度作相对运动时产生剪切应力为 1 帕(帕斯卡尔)。

动态粘度的工程制单位是公斤力·秒/米<sup>2</sup>; 物理制单位是达因·秒/厘米<sup>2</sup>, 叫作“泊”。

换算关系

1 帕·秒 = 1 牛顿·秒/米<sup>2</sup> = 1000 厘泊 = 0.102 公斤力·秒/米<sup>2</sup>

1 公斤力·秒/米<sup>2</sup> = 10000 厘泊 ≈ 10 帕·秒

1 厘泊 = 0.000102 公斤·秒/米<sup>2</sup> = 0.001 帕·秒

## 2) 运动粘度

运动粘度亦称粘性运动系数，用符号  $\nu$  表示。它是流体的动态粘度与密度在一个标准大气压下温度相同时的比值，可写作

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-17)$$

在国际单位制中，运动粘度的单位是米<sup>2</sup>/秒。1 米<sup>2</sup>/秒是指某一均质流体的运动粘度，而该流体的动态粘度是 1 帕·秒，密度是 1 公斤/米<sup>3</sup>。

运动粘度的工程制单位与国际制单位相同，也是米<sup>2</sup>/秒；物理制单位是厘米<sup>2</sup>/秒，叫作“施”或“斯”(斯施克司)。

### 单位换算关系

1 米<sup>2</sup>/秒 = 10000 厘米<sup>2</sup>/秒 = 10<sup>6</sup> 厘施

1 厘施 = 10<sup>-6</sup> 米<sup>2</sup>/秒 = 10<sup>-2</sup> 厘米<sup>2</sup>/秒

在表 1-2 和表 1-3 中给出了水和空气的运动粘度  $\nu$  值。

运动粘度  $\nu$  无特殊的物理意义，只因在计算和分析流体运动问题时经常遇到需考虑密度和动态粘度的情况，所以才引用了能综合表达这两个数量的运动粘度  $\nu$ 。又因为  $\nu$  具有运动学的因次，所以采用了运动粘度这一名称。

## 3) 条件粘度

条件粘度也称作相对粘度。它是用特定的粘度计在规定的条件下直接测出的粘度，根据测量条件的不同各国采用的条件粘度的单位也不一样。

在油液产品规格中多用条件粘度表示油液的粘度。我国当前常用恩氏粘度(°E)，在美国常用赛氏粘度(SSU)，在英国采用雷氏粘度(°R)。

恩氏粘度也称恩格尔度，是用恩格尔粘度计测定出的条件粘度。该粘度计系用于测定粘度比水大的液体的粘度。

恩格尔粘度计(图 1-5)的结构中主要包括：球形底的黄铜缸 2，缸底部焊有黄铜制的出口圆形短管 4。黄铜缸 2 置于水套 3 内。短管 4 用特殊的塞阀 1 开闭，塞阀的直径约为 3 毫米。

在测试前，将要测定粘度的液体 200 厘米<sup>3</sup> 注入缸 2 内。事前须将短管 4 用塞阀 1 堵严。在缸 2 中插入温度计 6，以便观测液温。利用烧灯或电热器加热，使水套内的水温保持一稳定值，从而使缸 2 内的液体温度也为一定值。当指示温度达到预测温度后，打开塞阀 1，并记录下 200 厘米<sup>3</sup> 液体从缸 2 内放空，流入量杯 5 内所需的时间  $t_1$ 。然后测定同体积的 200 厘米<sup>3</sup> 蒸馏水在 20°C 温度下从缸 2 内放空所需的时

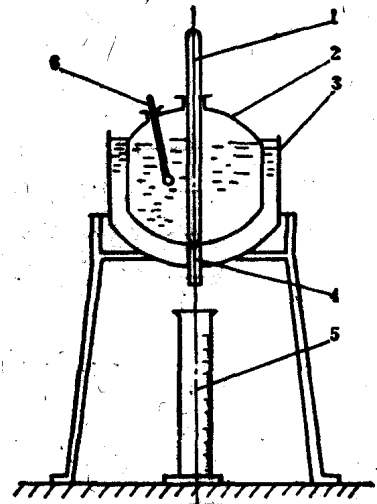


图 1-5 恩格尔粘度计示意图

1—塞阀 2—缸 3—水套  
4—短管 5—量杯 6—温度计

间  $t_2$  (平均约为 51 秒)。时间  $t_1$  与  $t_2$  之比值叫作恩格尔度, 用  $^{\circ}\text{E}$  表示, 即

$$^{\circ}\text{E} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-18)$$

用已知的恩格尔度  $^{\circ}\text{E}$ , 按下面的经验公式可求得液体的运动粘度

$$\nu = 7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \quad (\text{厘沲}) \quad (1-19)$$

上式适用于  $^{\circ}\text{E} > 2$  的情况。如果  $^{\circ}\text{E} \leq 2$  时, 则

$$\nu = 7.31^{\circ}\text{E} - \frac{C}{^{\circ}\text{E}} \quad (\text{厘沲}) \quad (1-20)$$

上式中的  $C$  可从表 1-7 查出。

表 1-7  $C$  之值

$^{\circ}\text{E}$	2.0	1.8	1.6	1.4	1.15
$C$	0.062	0.059	0.057	0.054	0.055

工业上常用  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$  和  $100^{\circ}\text{C}$  作为测定恩格尔度的标准温度, 它们的相应符号:  $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{50}$  和  $^{\circ}\text{E}_{100}$ 。

从上面介绍的粘度表示方法可知: 动态粘度和运动粘度是难以直接测得的。所以经常是利用专门仪器, 即粘度计先测出条件粘度, 然后利用有关公式计算出动态粘度或运动粘度。

在有关手册中给出了各种粘度单位之间的换算公式, 以及根据换算的数据绘制的曲线图, 可以查阅。

有时一种液体的粘度不能满足工程上所需的要求, 这就需把两种液体混合起来使用。这种措施叫作液体的调混或调合液体。调混液体的粘度与单一液体的粘度不一样, 其值以  $^{\circ}\text{E}$  表示, 并用下式计算

$$^{\circ}\text{E} = \frac{a^{\circ}\text{E}_1 + b^{\circ}\text{E}_2 - c(^{\circ}\text{E}_1 - ^{\circ}\text{E}_2)}{100} \quad (1-21)$$

式中  $^{\circ}\text{E}$ ——调合粘度;

$^{\circ}\text{E}_1$ 、 $^{\circ}\text{E}_2$ ——用于调合的两种液体的粘度,  $^{\circ}\text{E}_1 > ^{\circ}\text{E}_2$ ;

$a$ 、 $b$ ——两种液体各占的体积%;

$c$ ——系数, 从表 1-8 查取。

表 1-8 系数  $C$  值表

$a$ %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$b$ %	90	80	70	60	50	40	30	20	10
$c$ %	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

#### 例题 1-4

用恩格尔粘度计测得的石油粘度为  $8.5^{\circ}\text{E}$ , 该种油的重度  $\gamma = 8338.5$  牛顿/米<sup>3</sup>。求用国际单位制表示的石油的绝对粘度。

解: 按公式(1-19)求石油的运动粘度

$$\nu = 7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} = 7.31 \times 8.5 - \frac{6.31}{8.5} = 61.4 \text{ 厘沲}$$

改成国际单位制

$$\nu = 61.4 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

石油的密度

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{850}{9.8} = 86.7 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2/\text{米}^4$$

绝对粘度

$$\mu = \nu\rho = 61.4 \times 10^{-6} \times 86.7 = 0.00532 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}/\text{米}^2 = 0.0532 \text{ 帕} \cdot \text{秒}$$

### 3. 压力和温度对粘性的影响

由于流体的粘性主要取决于分子间的相互作用力，当压力增加时，体积变小，分子间的距离也减小，相互作用力增大，因而粘性也增大。以润滑油等油液为例，压力在 50 个大气压以下时，其粘性变化很小，可以忽略不计。但在压力超过 200 个大气压时，粘性就明显地增加。所以讨论这个问题，对于高压的液压系统具有重要的意义。当压力改变时，矿物油粘性的增加程度比植物油和动物油为大。

在计算时，液体的运动粘度与压力之间的关系可表示为

$$\nu = \nu_0 e^{bP} \quad (1-22)$$

式中  $\nu$  —— 压力为  $P$  (公斤力/厘米<sup>2</sup>) 时液体的运动粘度；

$\nu_0$  —— 1 工程大气压时液体的运动粘度；

$b$  —— 指数。其值因液体的种类而异。对于普通液压油  $b = 0.002 \sim 0.003$  厘米<sup>2</sup>/公斤力。

流体的粘性随温度变化而改变的程度远比随压力变化大得多。在液体温度升高以后，其体积要加大，液体分子间的吸引力则要减小，也就是随着温度的增加，粘性要降低。对于气体则其变化与液体不同。气体分子间的距离大，分子间的引力很小。所以气体的粘性主要取决于气体分子的运动状态。当温度升高时，气体分子运动加强了，因此气体的粘性要随温度升高而加大。

在表 1-2 和表 1-3 中可看出，水的  $\nu$  值随温度上升而变小，空气的  $\nu$  值则相反。

图 1-6 是机器油和水的运动粘度随温度的变化曲线。

液压传动用不超过  $6^{\circ}E_{50}$  的矿物油，其运动粘度在  $30 \sim 150^{\circ}C$  范围内的改变量可按下面的经验公式计算

$$\nu_t = \nu_{50} \left( \frac{50}{t} \right)^n \quad (1-23)$$

式中  $\nu_t$  ——  $t^{\circ}C$  时的运动粘度，厘米<sup>2</sup>/秒；

$\nu_{50}$  ——  $t = 50^{\circ}C$  时的运动粘度，厘米<sup>2</sup>/秒；

$n$  —— 指数，见表 1-9。

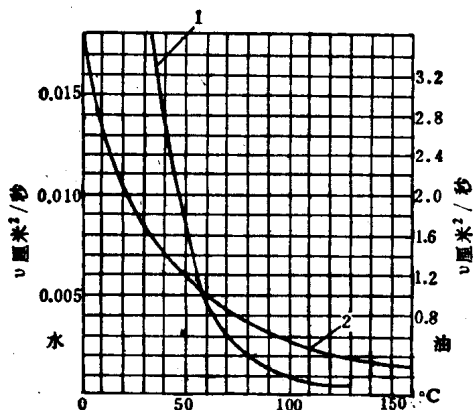


图 1-6 机器油和水的粘度随温度的变化曲线

1—机器油 2—水



表 1-9 指数  $n$  的值

$\cdot E_{50}$	1.2	1.5	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
$n$	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32

在图 1-7 上列出了国产液压用油的粘度与温度间的变化图线。

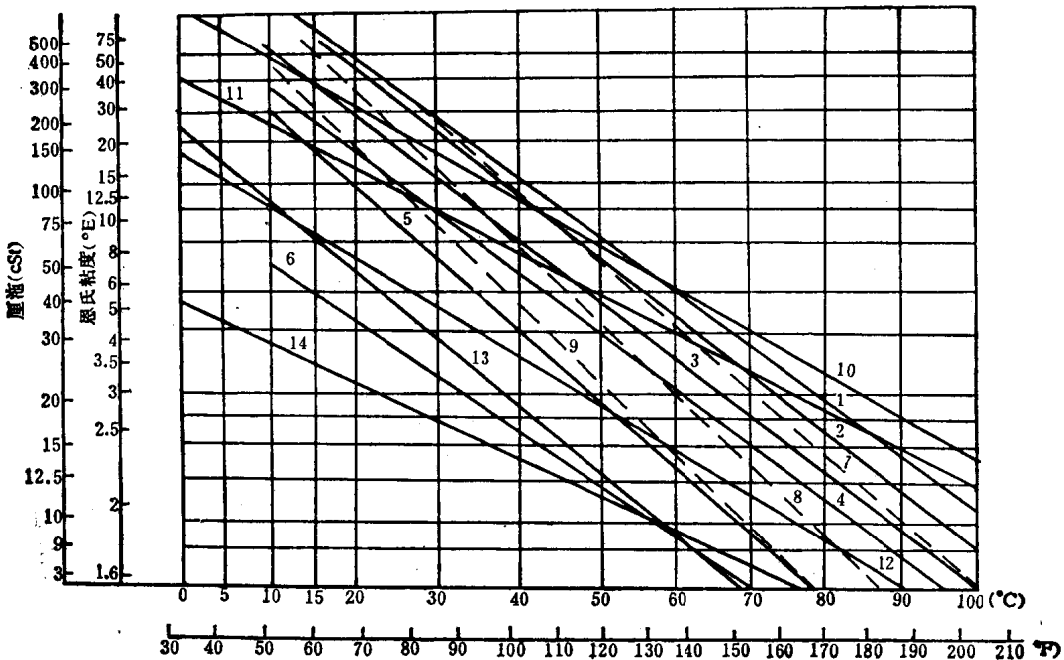


图 1-7 国产液压油的粘度与温度关系图

- 1—70号机械油(10号柴油机油) 2—50号机械油 3—40号机械油 4—30号机械油  
 5—20号机械油 6—10号机械油 7—40号汽轮机油 8—30号汽轮机油 9—22号汽轮机油  
 10—上稠90-1 11—上稠50-1 12—上稠30-1 13—上稠20-1 14—10号航空液压油

从图 1-7 上看出，机械工业所用的各种液压油的粘度随温度而发生的变化是不同的。有的较轻微，有的较剧烈。油液粘度的变化程度可以反映出一种油液的使用性。当温度变化大时，油液粘度变化小，则使用性好，这种油液具有平缓的粘度与温度关系曲线。具有优良使用性的油液，在温度改变时仍能保持较为稳定的粘性，在流动中不会产生过分剧烈的阻力的变化，使动力机能保持在较均衡的负载下运行。在液压系统中也能保持传动的平稳性；在润滑系统中也不会造成零件的快速磨损。但任何一种油液都不可能在温度变化很大范围内保持粘性不发生较大的变化。所以，要根据工作条件的变化更换相适应的工作油液，以使机器或系统能正常运行。

#### 4. 非牛顿流体的特征

在自然界中有某些流体的粘性不是遵循牛顿内摩擦定律变化的。例如，液态水泥、钻井中的稠泥浆、接近凝固状态的石油和胶体等均属于这种流体。这些流体叫作非牛顿流体，它们的内摩擦力不遵循公式(1-14)表示的规律。

相对而言，水、空气、机器油等均属于牛顿流体。