

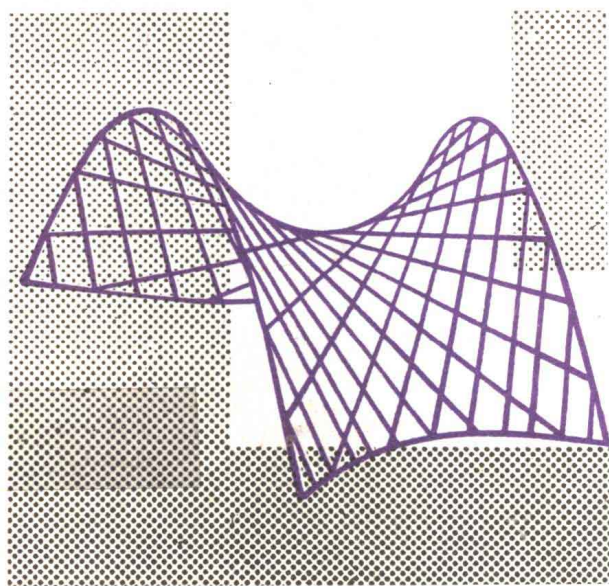
高等学校建筑工程专业系列教材

水力学

995148

哈尔滨建筑大学 刘鹤年 编

● 中国建筑工业出版社



995148

高等学校建筑工程专业系列教材

水 力 学

哈尔滨建筑大学 刘鹤年 编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/刘鹤年编. -北京:中国建筑工程工业出版社, 1998

高等学校建筑工程专业系列教材

ISBN 7-112-03541-4

I. 水… II. 刘… III. 水力学-高等学校-教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 19086 号

本书是根据建筑工程学科水力学课程教学的基本要求, 以及全国注册结构工程师流体力学考试大纲编写的。

全书主要内容有: 绪论, 流体静力学, 流体动力学基础, 量纲分析和相似原理, 流动阻力和水头损失, 孔口、管嘴出流和有压管流, 明渠流动, 堰流, 渗流等。考虑到不同学校课程时数和教学进度的差别, 书中带 * 号的各节供灵活选用。

本书可作为建筑工程专业的教材及全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书, 也可供相关专业工程技术人员参考。

高等学校建筑工程专业系列教材

水 力 学

哈尔滨建筑大学 刘鹤年 编

*

中国建筑工程工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13½ 字数: 327 千字

1998 年 12 月第一版 1998 年 12 月第一次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 13.90 元

ISBN 7-112-03541-4

TU·2732 (8781)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是根据原国家教委高等学校工科力学课程教学指导委员会和建筑工程学科专业指导委员会审订的水力学课程教学基本要求，以及全国注册结构工程师流体力学考试大纲编写的，既可作为建筑工程专业水力学（流体力学）课程教材，也可用作市政、环境、水利等专业的水力学（流体力学）基础教材。

本书从水力学课程的基础地位出发，加深加宽理论基础和通用性，在不削弱一元流动理论的同时，加强对质点运动的分析，注意运用基本方程分析流动问题，引导学以致用，重在培养学生分析问题的能力。本书在叙述和分析的风格和深度上有一定特色。

根据土木工程专业学生的基础情况和减少课内教学时数的需要，本书适当提高了知识起点，并精减传统的经验性内容和计算方法，尽量减少篇幅，以便于组织教学。

本书的编写得到原国家教委工科力学课程教学指导委员会水力学和流体力学组专家的鼓励和指导，也得到哈尔滨建筑大学领导和水力学教研室的大力支持，在此谨致谢意。

由于本人学识所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水力学及其任务	1
第二节 作用在流体上的力	2
第三节 流体的主要物理性质	3
第四节 牛顿流体和非牛顿流体	8
习题	10
第二章 流体静力学	12
第一节 静止流体中应力的特性	12
第二节 流体平衡微分方程	13
第三节 重力作用下静止液体中压强的分布规律	15
第四节 液柱式测压计	19
第五节 * 液体的相对平衡	22
第六节 液体作用在平面上的总压力	25
第七节 液体作用在曲面上的总压力	30
习题	33
第三章 流体动力学基础	38
第一节 流体运动的描述	38
第二节 欧拉法的基本概念	41
第三节 * 流体微团运动的分析	47
第四节 连续性方程	52
第五节 流体的运动微分方程	55
第六节 元流的伯努利方程	59
第七节 总流的伯努利方程	62
第八节 总流的动量方程	69
习题	73
第四章 量纲分析和相似原理	77
第一节 量纲分析的意义和量纲和谐原理	77
第二节 量纲分析法	79
第三节 相似理论基础	84
第四节 模型实验	89
习题	92
第五章 流动阻力和水头损失	94
第一节 流动阻力和水头损失的分类	94
第二节 粘性流体的两种流态	95
第三节 沿程水头损失与切应力的关系	98
第四节 圆管中的层流运动	99

第五节	紊流运动	101
第六节	紊流的沿程水头损失	105
第七节	局部水头损失	115
第八节	边界层概念与绕流阻力	119
	习题	125
第六章	孔口、管嘴出流和有压管流	129
第一节	孔口出流	129
第二节	管嘴出流	132
第三节	短管的水力计算	133
第四节	长管的水力计算	137
第五节	离心泵的原理和选用	142
第六节	有压管道中的水击	145
	习题	149
第七章	明渠流动	154
第一节	概述	154
第二节	明渠均匀流	156
第三节	无压圆管均匀流	161
第四节	明渠流动状态	165
第五节	水跃和水跌	170
第六节	棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	175
第七节	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	182
	习题	184
第八章	堰流	186
第一节	堰流及其特征	186
第二节	宽顶堰溢流	187
第三节	薄壁堰和实用堰溢流	191
第四节*	小桥孔径的水力计算	193
	习题	196
第九章	渗流	197
第一节	概述	197
第二节	渗流的达西定律	198
第三节	地下水的渐变渗流	200
第四节	井和井群	202
	习题	206
习题答案		207
主要参考文献		210

第一章 绪 论

第一节 水力学及其任务

一、水力学的定义

水力学是研究液体机械运动规律及其应用的科学。这个简单的定义，概括了三个涵义。

第一，水力学研究的对象是液体，液体和气体合称流体。流体的基本特征是具有流动性。观察流动现象，诸如微风吹过平静的水面，水面因受气流的摩擦力（切力）而流动；斜坡上的水因受重力沿坡面的切向分力而流淌，由此可得出流体静止时不能承受切力，或者说任何微小切力的作用，都会使流体流动，直到切力消失，流动才会停止的结论，这就是流动性的力学解释。

此外，流体无论静止或运动都几乎不能承受拉力。在不考虑压缩性的条件下，液体运动的规律也适用于气体。

第二，水力学研究的内容是机械运动规律。液体运动遵循机械运动的普遍规律，如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等，并以这些普遍规律，作为建立水力学理论的基础。

第三，水力学研究的目的在于应用。水力学作为力学的一个分支，是基础科学，同时也是与工农业生产密切相关的应用科学。现代水力学（流体力学）已经渗透到工程技术各个领域，下一个世纪，随着科学技术的发展，水力学（流体力学）将得到更为广泛的应用。

二、连续介质模型

水力学研究的对象是液体，从微观角度来看，液体是由大量的分子构成的，这些分子都在作无规则的热运动。由于分子之间存在空隙，液体的物理量（如密度、压强和流速等）在空间的分布是不连续的。同时，由于分子的随机运动，导致空间任一点上液体物理量在时间上的变化也是不连续的。显然要以分子为对象来研究液体的运动，将极为困难。现代物理研究表明，在常温下， 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子，分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。可见分子间距离之微小，即使在很小的体积中也含有大量的分子，足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

水力学只研究液体宏观机械运动的规律。1755 年瑞士数学家和力学家欧拉 (Euler)，首先提出把流体当做是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究，这就是连续介质模型。这里所说的质点，是指大小同一切流动空间相比微不足道，又含有大量分子具有一定质量的流体微元。建立连续介质模型，是为摆脱分子运动的复杂性，对流体物质结构的简化。按连续介质模型，流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数，这样，就可用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型对于学过固体力学的读者并不陌生。在材料力学和弹塑性力学中，都是把受力构件当作连续介质，来研究应力和变形的规律，可以说连续介质模型是固体和流体许多分支学科共同的理论基础。

三、水力学的研究方法

水力学的研究方法，大体上有理论、数值和实验三种。

理论研究方法是通过对液体性质及流动特性的科学抽象，提出合理的理论模型，应用已有的普遍规律，建立控制液体运动的闭合方程组，将原来的具体流动问题转化为数学问题，并在一定的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法，首先由欧拉创立，并逐步完善，已发展成理论流体力学，成为流体力学的主要组成部分。但由于数学上的困难，许多实际流动问题还难以精确求解。

数值方法是在计算机应用的基础上，采用各种离散化方法（有限差分法、有限元法等），建立各种数值模型，通过计算机进行数值计算和数值试验，得到在时间和空间上许多数字组成的集合体，最终获得定量描述流场的数值解。近二三十年来，这一方法得到很大发展，已形成一专门学科——计算流体力学。

实验研究方法是通过对具体流动的观测与测量来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证，实验又须用理论来指导。水力学的实验研究包括原型观测和模型实验，而以模型实验为主。

上述三种方法互相结合，为发展水力学理论，解决复杂的工程技术问题奠定了基础。

第二节 作用在流体上的力

力是造成机械运动的原因，因此研究流体机械运动的规律，就要从分析作用于流体上的力入手。作用在流体上的力，按作用方式的不同，分为两类。

一、表面力

表面力是通过直接接触，施加在接触表面上的力。

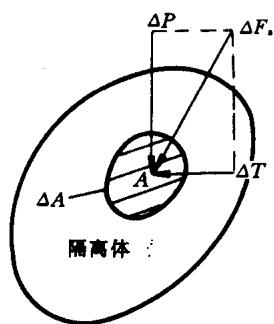


图 1-1 表面力

在流动中取隔离体为研究对象（图 1-1），周围流体对隔离体的作用以分布的表面力代替。表面力的大小（集度）用应力来表示。

设 A 为隔离体表面上的一点，包含 A 点取微小面积 ΔA ，若作用在 ΔA 上的总表面力为 $\Delta \vec{F}$ ，将其分解为法向分力（压力） ΔP 和切向分力 ΔT ，则

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \text{为 } \Delta A \text{ 上的平均压应力}$$

取极限 $p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 A 点的压应力，习惯上称为 A 点的压

强；

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad \text{为 } A \text{ 点的切应力。}$$

应力的单位是帕斯卡 (Pascal), 简称帕, 以符号 Pa 表示, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。

二、质量力

质量力是以隔距离作用, 施加在每个质点上的力。重力是最常见的质量力。除此之外, 若所取坐标系为非惯性系, 建立力的平衡方程时, 出现的惯性力如离心力、科里奥利 (Coriolis) 力也归为质量力。

质量力大小用单位质量力表示。设均质流体质量为 m , 所受质量力为 $\vec{F}_B$, 则单位质量力

$$\vec{f}_B = \frac{\vec{F}_B}{m}$$

单位质量力在各坐标轴上分量

$$X = \frac{F_{Bx}}{m}, Y = \frac{F_{By}}{m}, Z = \frac{F_{Bz}}{m}$$

$$\vec{f}_B = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

若作用在流体上的质量力只有重力 (图 1-2), 则

$$F_{Bx} = 0, F_{By} = 0, F_{Bz} = -mg$$

单位质量力 $X=0, Y=0,$

$$Z = \frac{-mg}{m} = -g$$

单位质量力的单位为 m/s^2 , 与加速度单位相同。

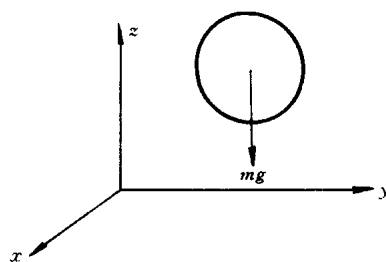


图 1-2 重力

第三节 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素, 同流体运动有关的主要物理性质是惯性、粘性和压缩性。

一、惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质, 凡改变物体的运动状态, 就必须克服惯性的作用。

质量是惯性大小的度量, 单位体积的质量称为密度, 以符号 ρ 表示。如均质流体的体积为 V , 质量为 m , 则

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

密度的单位是 kg/m^3 。

液体的密度随压强和温度的变化量很小, 一般可视为常数, 采用水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 水银的密度为 $13600\text{kg}/\text{m}^3$ 。

气体的密度随压强和温度变化, 一个标准大气压, 0°C 空气的密度为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在一个标准大气压条件下, 水的密度见表 1-1, 几种常见流体的密度见表 1-2。

水的密度

表 1-1

温度 (°C)	0	4	10	20	30
密度 (kg/m³)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度 (°C)	40	50	60	80	100
密度 (kg/m³)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

几种常见流体的密度

表 1-2

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度 (°C)	20	20	20	20	15	15
密度 (kg/m³)	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030

二、粘性

粘性是流体固有的物理性质，可从三个方面去认识。

1. 粘性的表象

观察图 1-3 所示，两个平行平板，其间充满静止流体，两平板间距离 h ，以 y 方向为法线方向。保持下平板固定不动，使上平板沿所在平面以速度 U 运动，于是粘附于上平板表面的一层流体，随平板以速度 u 运动，并逐层向内影响，各层相继流动，直至粘附于下平面的流层速度为零。在 U 、 h 都较小的情况下，各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

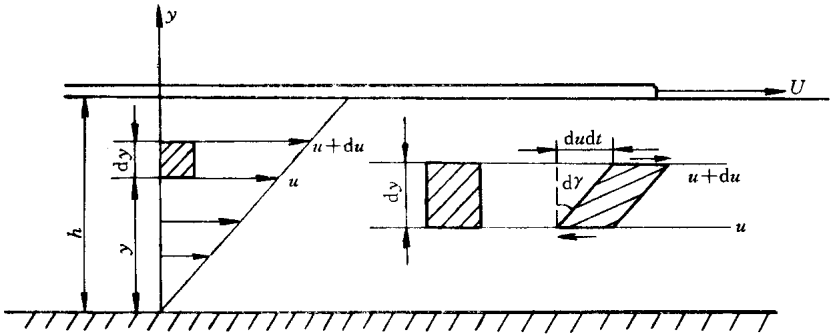


图 1-3 粘性表象

上平板带动粘附在板上的流层运动，而能影响到内部各流层运动，说明内部各流层间存在着切向力，即内摩擦力，这就是粘性的宏观表象。由此得出，粘性是流体的内摩擦特性。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿 (Newton, I) 在 1686 年提出，并经后人验证，内摩擦力 (切力) T 与流速梯度 $\frac{U}{h} = \frac{du}{dy}$ 成比例；与流层的接触面积 A 成比例；与流体的性质有关；与接触面上的压力无关。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

以应力表示

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式 (1-2)、式 (1-3) 称为牛顿内摩擦定律。

式中 $\frac{du}{dy}$ 为流速在法线方向的变化率, 称为速度梯度。为进一步说明该项的物理意义, 在厚度为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团, 这里微团就是质点, 只是在考虑尺度效应 (旋转、变形) 时, 习惯上称为微团 (图 1-3)。因上、下层的流速相差 du , 经 dt 时间, 微团除位移外, 还发生剪切变形 $d\gamma$

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du}{dy} dt$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt}$$

可知速度梯度 du/dy 实为流体微团的剪切变形速度, 牛顿内摩擦定律也可表示为

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \tag{1-4}$$

表明流体因粘性产生的内摩擦力与微团的剪切变形速度 (或剪切变形速率) 成正比, 所以粘性的定义又可为流体阻抗剪切变形速度的特性。

μ 是比例系数, 称为动力粘度 (动力粘滞系数), 单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力粘度是流体粘性的度量, μ 值越大, 流体越粘, 流动性越差。流体的粘度受压力的影响很小, 随温度而变化, 不同温度水和空气的粘度见表 1-3、表 1-4。

不同温度下水的粘度 表 1-3

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

不同温度下空气的粘度 表 1-4

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

在分析粘性流体运动规律的过程中, 动力粘度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现, 将其

定义为液体的运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

运动粘度的单位为 m^2/s 。

由表 1-3、表 1-4 可见，液体的粘度随温度升高而减小，气体的粘度则随温度升高而增大。原因是液体分子间的距离很小，分子间的引力即内聚力是构成粘性的主要因素，温度升高，分子间距离增大，内聚力减小，粘度随之减小；气体分子间的距离远大于液体，分子热运动引起的动量交换是形成粘性的主要因素，温度升高，分子热运动加剧，动量交换加大，粘度随之增大。

3. 理想流体

实际的流体无论液体或气体，都是有粘性的。粘性的存在，往往给流体运动规律的研究带来极大困难。为了简化理论分析，特引入理想流体的概念。所谓理想流体，是指无粘性即 $\mu=0$ 或 $\nu=0$ 的流体。理想流体实际上是不存在的，它只是一种对物性简化的力学模型。

由于理想流体不考虑粘性，使对流动的分析大为简化，从而能得出理论分析的结果。所得结果对某些粘性影响很小的流动，能够较好地符合实际；对粘性影响不能忽略的流动，则可通过实验加以修正，从而能比较容易地解决许多实际流动问题。这是处理粘性流体运动的一种有效方法。

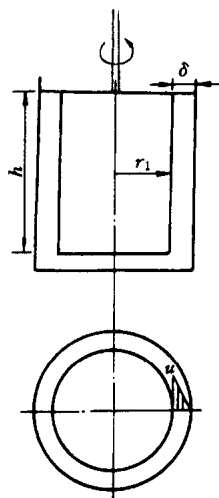


图 1-4 旋转粘度计

【例 1-1】 旋转圆筒粘度计，外筒固定，内筒由同步电机带动旋转，内外筒间充入实验液体（图 1-4）。已知内筒半径 $r_1=1.93\text{cm}$ ，外筒半径 $r_2=2\text{cm}$ ，内筒高 $h=7\text{cm}$ ，实验测得内筒转速 $n=10\text{r/min}$ ，转轴上扭矩 $M=0.0045\text{N}\cdot\text{m}$ 。试求该实验液体的粘度。

【解】 充入内外筒间隙中的实验液体，在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小，速度近似直线分布，不计内筒端面的影响，内筒切应力

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

其中内筒旋转角速度 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$

$$\text{扭矩} \quad M = \tau \cdot 2\pi r_1 \cdot h \cdot r_1 = \frac{\mu \omega 2\pi r_1^3 h}{\delta}$$

$$\mu = \frac{M\delta}{2\pi \omega r_1^3 h} = 0.952 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

三、压缩性和膨胀性

压缩性是流体因压强增大，分子间距离减小，体积压缩的性质。膨胀性是温度升高，分子间距离增大，体积膨胀的性质。

1. 压缩性

液体的压缩性用压缩系数表示。若在一定温度下，液体的体积为 V ，压强增加 $d p$ 后，

体积减小 dV ，则压缩系数

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \tag{1-6}$$

κ 的单位是 m^2/N 。

根据液体压缩前后，质量 ρV 不变，有

$$- \frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

则

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \tag{1-7}$$

液体的压缩系数随温度和压强变化，水在 0°C ，不同压强下的压缩系数如表 1-5。表中 at 为工程大气压， $1\text{at}=98000\text{N}/\text{m}^2$ 。

水的压缩系数					表 1-5
压强 (at)	5	10	20	40	80
$\kappa \times 10^9 \text{ (m}^2/\text{N)}$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

压缩系数的倒数是体积模量，即

$$K = \frac{1}{\kappa} = - V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \tag{1-8}$$

K 的单位是 N/m^2 ，进行水击计算时，水的体积模量可取 $K=2.1 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。

2. 膨胀性

液体的膨胀性用体膨胀系数表示，若在一定压强下，液体的体积为 V ，温度升高 dT 后，体积增加 dV ，则

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \tag{1-9}$$

α_v 的单位是温度的倒数， $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$ 。

液体的膨胀系数随压强和温度而变化，水在 1 标准大气压下，不同温度时的膨胀系数，见表 1-6。

水的膨胀系数					表 1-6
温度 ($^\circ\text{C}$)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\alpha_v \times 10^4 \text{ (1/}^\circ\text{C)}$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

水的体膨胀系数，在常温常压下约为 $1/10^5$ ，在液压封闭系统或热水采暖系统中，当工作温度变化较大时，需考虑体积膨胀对系统造成的影响。

3. 不可压缩流体

实际流体都是有压缩性的。有些流动，流体在流动过程中，密度的变化很小，可以忽略，由此引出不可压缩流体的概念。所谓不可压缩流体，是指每个质点在运动全过程中密度不变化的流体，对于均质的不可压缩流体，密度时时处处都不变化，即 $\rho=\text{常数}$ 。不可压

缩流体是又一理想化的力学模型。

液体的压缩系数很小（体积模量很大），在相当大的压强变化范围内，密度几乎不变。因此，一般的液体平衡和运动问题，都可按不可压缩流体进行理论分析。对于某些特殊的流动现象，如有压管流的水击，水中爆炸波的传播等，压缩性起着关键作用，则必须考虑液体的压缩性。

气体的压缩性远大于液体，是可压缩流体。需要指出的是，在土木工程中有许多气流运动，如通风管道、低温烟道，气流的速度不大，远小于声速（约 340m/s），管道也不很长，气体在流动过程中，密度没有明显变化，仍可做为不可压缩流体处理。

第四节 牛顿流体和非牛顿流体

一、流变性

牛顿内摩擦定律式（1-3），给出了流体简单剪切流动（图 1-3）时，切应力与剪切变形速度的关系。这种关系反映流体物料的力学性质，称为流变性，表示流变关系的曲线称为流变曲线。

水和各种气体的流变性符合牛顿内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

这样的流体（液体、气体）统称为牛顿流体。牛顿流体的动力粘度 μ ，在一定的温度和压力下是常数，切应力与剪切变形速度成线性关系，流变曲线是通过坐标原点的直线（图 1-5a），斜率就是牛顿流体的粘度。即

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} = \tan\theta$$

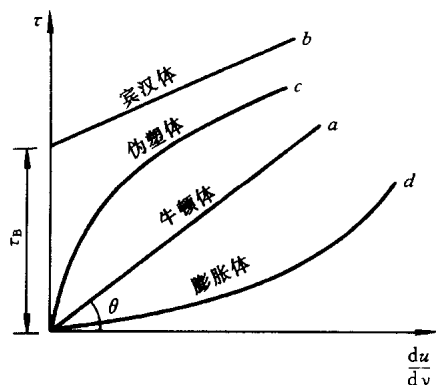


图 1-5 流变曲线

除了以水和空气为代表的牛顿流体外，自然界和工程中还有许多液体物料（如沥青、水泥砂浆等）的流变性不符合牛顿内摩擦定律，其流变曲线不是通过坐标原点的直线（图 1-5, b~d），这样的流体统称为非牛顿流体。

对于非牛顿流体，也类似于牛顿流体，把切应力与剪切变形速度之比的定义为非牛顿流体的表观粘度，表观粘度一般随剪切变形速度和剪切持续时间而变化。

二、非牛顿流体简介

非牛顿流体根据表观粘度是否和剪切持续时间有关，将其分为非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体两类。下面介绍工程中最常见的几种非时变性非牛顿流体。

（1）宾汉体（Bingham fluid）也称塑性流体。流变方程为

$$\tau = \tau_B + \eta_P \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中 τ_B ——屈服应力，单位 N/m^2 ；

η_p ——塑性粘度，单位 $N \cdot s/m^2$ 。

宾汉体的流变曲线是切应力有初值（屈服应力）的直线（图 1-5b）。由图可见，宾汉体的流动特点是施加的切应力超过屈服值 τ_B ，才能产生流动，而流动过程中，切应力和剪切变形速度成线性关系。宾汉体是含有固相颗粒的多相液体，作为分散相的颗粒间有强烈的相互作用，在静止时形成网状结构，只有施加的切应力足以破坏网状结构，流动才能进行，破坏网状结构的切应力便是屈服应力。通过改变分散相表面的物理化学性质，达到推迟网状结构的形成，减弱颗粒间的联系，从而降低屈服值，增强流动性，这一点具有很大的实用意义。

宾汉体是工业上应用极为广泛的液体材料，如新拌水泥砂浆、新拌混凝土、上水污泥、某些石油制品、高含蜡低温原油、牙膏、油漆及中等浓度的悬浮液等。

(2) 伪塑性流体 (Pseudoplastic fluid) 流变方程为

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad n < 1 \quad (1-11)$$

式中 k ——稠度系数，单位 $N \cdot s^n/m^2$ ；

n ——流变指数。

伪塑性流体的流变曲线大体上是通过坐标原点并向上凸的曲线（图 1-5c）。由图可见，伪塑性流体的流动特点是随着剪切变形速度的增大，表观粘度降低，流动性增大，表现出流体变稀，因此伪塑性流体又称为剪切稀化流体。

伪塑性流体是含有长链分子结构的高聚物熔体和高聚物溶液，以及含有细长纤维或颗粒的悬浮液。由于长链分子或颗粒之间的物理化学作用，形成某种松散结构，随着剪切变形速度的增大，结构逐渐被破坏，长链分子沿流动方向定向排列，使流动阻力减小，表观粘度降低。高分子聚合物溶液、某些原油、人的血液都是伪塑性流体。

(3) 膨胀流体 (Dilatan fluid) 流变方程为

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad n > 1 \quad (1-12)$$

式中 k ——稠度系数，单位 $N \cdot s^n/m^2$ ；

n ——流变指数。

膨胀流体的流变曲线大体上是通过坐标原点并向下凹的曲线（图 1-5d）。由图可见，膨胀流体的流动特点是随着剪切变形速度的增大，表观粘度增大，流动性降低，表现出流体增稠，因此膨胀流体又称为剪切稠化流体。

对剪切稠化，雷诺最早的解释是：膨胀流体多为含很高浓度不规则形状固体颗粒的悬浊液，此种悬浊液在低剪切速度时，不同粒度的颗粒排列较密，随着剪切速度的增大，使颗粒间空隙增大，存在于空隙间起润滑作用的液体数量不足，流动阻力增大，表观粘度增大。

特别高浓度的挟沙水流、淀粉糊、阿拉伯树胶溶液等是膨胀流体。

随着现代工业的发展和新材料的开发，非牛顿流体力学已成为流体力学一个新的分支。

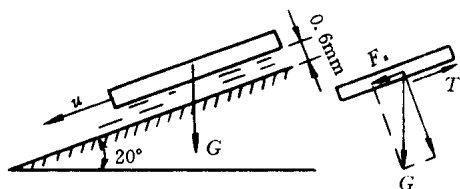
习 题

选择题 (单选题)

- 1-1 按连续介质的概念, 流体质点是指: (a) 流体的分子; (b) 流体内的固体颗粒; (c) 几何的点; (d) 几何尺寸同流动空间相比是极小量, 又含有大量分子的微元体。
- 1-2 作用于流体的质量力包括: (a) 压力; (b) 摩擦阻力; (c) 重力。
- 1-3 单位质量力的国际单位是: (a) N; (b) m/s; (c) N/kg; (d) m/s²。
- 1-4 与牛顿内摩擦定律直接有关的因素是: (a) 切应力和压强; (b) 切应力和剪切变形速度; (c) 切应力和剪切变形。
- 1-5 水的 [动力] 粘度随温度的升高: (a) 增大; (b) 减小; (c) 不变。
- 1-6 流体运动粘度 ν 的国际单位是: (a) m²/s; (b) N/m²; (c) kg/m; (d) N · s/m²。
- 1-7 理想流体的特征是: (a) 粘度是常数; (b) 不可压缩; (c) 无粘性; (d) 符合 $pv=RT$ 。
- 1-8 当水的压强增加 1 个大气压时, 水的密度增大约为: (a) 1/20, 000; (b) 1/10, 000; (c) 1/4000。

计算题

- 1-9 水的密度为 1000kg/m³, 2L (升) 水的质量和重量是多少?
- 1-10 500L 水银的质量为 6795kg, 水银的密度是多少?
- 1-11 体积为 0.5m³ 的油料, 重量为 4410N, 试求该油料的密度是多少?

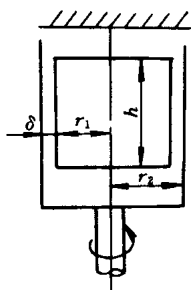


题 1-14 图

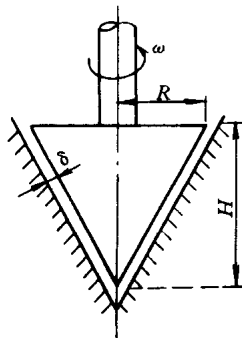
1-12 某液体的动力粘度为 0.005Pa · s, 其密度为 850kg/m³, 试求其运动粘度。

1-13 有一底面积为 60×40cm² 的木板, 质量为 5kg, 沿一与水平面成 20° 角的斜面下滑。油层厚度为 0.6mm。如以等速度 0.84m/s 下滑时, 求油的动力粘度 μ 。

1-14 图示为一转筒粘度计, 它由内外两同心圆筒组成, 外筒以角速度 n r/min 转动, 通过两筒间的液体将力矩传至内筒。内筒挂在一金属丝下, 该丝所受扭矩 M 可由其转角来测定。若两筒间的间隙 $\delta=r_2-r_1$, 底部对内筒的影响不计。试证明动力粘度 μ 的计算公式为 $\mu=15M\delta/[\pi^2r_1^2r_2hn]$ 。



题 1-15 图



题 1-16 图

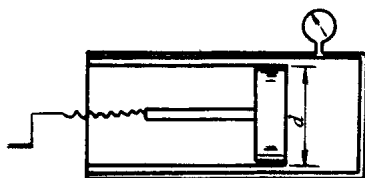
1-15 一圆锥体绕其中心轴作等角速度 $\omega=16\text{rad/s}$ 旋转, 锥体与固定壁面间的距离 $\delta=1\text{mm}$, 用 $\mu=0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 的润滑油充满间隙, 锥体半径 $R=0.3\text{m}$, 高 $H=0.5\text{m}$, 求作用于圆锥体的阻力矩。

1-16 活塞加压, 缸体内液体的压强为 0.1MPa 时, 体积为 1000cm³, 压强为 10MPa 时, 体积为 995cm³。试求液体的体积模量。

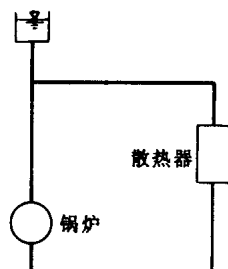
1-17 图示为压力表校正器。器内充满压缩系数为 $k=4.75 \times 10^{-10}\text{m}^2/\text{N}$ 的油液, 器内压强为 10⁵Pa 时

油液的体积为 200mL。现用手轮丝杆和活塞加压，活塞直径为 1cm，丝杆螺距为 2mm，当压强升高至 20MPa 时，问需将手轮摇多少转？

1-18 图示为一水暖系统，为了防止水温升高时体积膨胀将水管胀裂，在系统顶部设一膨胀水箱。若系统内水的总体积为 8m^3 ，加温前后温差为 50°C ，在其温度范围内水的膨胀系数 $\alpha_v = 0.0005\text{ }1/^\circ\text{C}$ ，求膨胀水箱的最小容积。



题 1-18 图



题 1-19 图