

高等学校教材

水力学

郑州工学院 吴桢祥 杨玲霞 编著
华北水利水电学院 李国庆 孙东坡

气象出版社

前 言

水力学是工科高等学校多种专业重要的技术基础课，虽然各专业对它的要求和侧重面不尽相同，但其基本内容应该是共同的。教学实践中往往很需要一本能照顾到相近各专业的教学基本要求，适用而较宽的水力学教材。它既强调基本理论，体系完整内容新颖，又注重拓宽知识，联系实际且深浅适度便于教学应用。本书就是为此目的根据部课程建设计划和相应的大纲而编写的。

本书可供水利、土建、给排水、环工、道桥、地质、水保等各专业教学应用，经适当取舍也可作为专科有关专业的教材。本书也是工程技术人员的参考书。

本书由郑州工学院水力学教研室与华北水利水电学院水力学教研室合编，第一、二、三章由吴桢祥编写，第四、八章由孙东坡编写，第五、七章由杨玲霞编写，第六、九章由李国庆编写，全书内容均经集体研究讨论，由吴桢祥主编。

由于编者水平所限，书中尚有许多不足之处，缺点和错误在所难免，恳切希望读者予以批评指正。

编著者
1994年6月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 水力学的任务与发展简史	(1)
§ 1-2 水力学的研究对象与连续介质概念	(1)
§ 1-3 液体的主要物理力学性质	(2)
§ 1-4 作用于液体上的力	(9)
第二章 水静力学	(12)
§ 2-1 静水压强及其特性	(12)
§ 2-2 液体的平衡微分方程	(14)
§ 2-3 重力作用下液体的平衡	(16)
§ 2-4 压强测量	(20)
§ 2-5 几种质量力同时作用下的液体平衡	(22)
§ 2-6 作用于平面上的静水总压力	(25)
§ 2-7 作用于曲面上的静水总压力	(29)
第三章 水动力学基础	(40)
§ 3-1 描述液体运动的两种方法	(40)
§ 3-2 液体运动的基本概念与分类	(43)
§ 3-3 恒定总流的连续性方程	(53)
§ 3-4 恒定总流的能量方程	(55)
§ 3-5 能量方程应用举例	(68)
§ 3-6 空化(气穴)与空蚀(气蚀)	(76)
§ 3-7 恒定总流的动量方程	(78)
§ 3-8 恒定总流的动量矩方程	(85)
§ 3-9 液体微团运动的基本形式	(88)
§ 3-10 连续性微分方程	(93)
§ 3-11 理想液体运动微分方程及其积分	(94)
§ 3-12 恒定平面势流	(99)
第四章 液流型态与水头损失	(113)
§ 4-1 水流阻力与水头损失	(112)
§ 4-2 均匀流沿程水头损失的基本方程	(114)
§ 4-3 液流流动型态	(117)
§ 4-4 层流运动及其沿程水头损失计算	(122)
§ 4-5 紊流运动特性	(124)
§ 4-6 紊流沿程水头损失的计算	(134)
§ 4-7 局部水头损失	(142)
§ 4-8 边界层及其分离现象	(149)

§ 4-9 水流内部能量关系和紊流扩散简介	(154)
第五章 孔口、管嘴出流及有压管流	(162)
§ 5-1 孔口、管嘴出流	(162)
§ 5-2 简单管道的水力计算	(170)
§ 5-3 复杂管道的水力计算	(184)
§ 5-4 管网水力计算基础	(188)
§ 5-5 气、浆液的管道输送	(196)
§ 5-6 有压管中的水击	(201)
第六章 明渠恒定流动	(218)
§ 6-1 明渠的几何特征及其分类	(218)
§ 6-2 明渠均匀流的特征和计算公式	(220)
§ 6-3 明渠均匀流的水力计算	(227)
§ 6-4 明渠水流的流态和断面比能特性	(238)
§ 6-5 水跃和水跌	(247)
§ 6-6 明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	(255)
§ 6-7 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(264)
§ 6-8 天然河道水面曲线的计算和弯道水流简介	(277)
第七章 过流建筑的水力计算	(285)
§ 7-1 概述	(285)
§ 7-2 堰流的水力计算	(287)
§ 7-3 桥涵水力计算	(301)
§ 7-4 闸孔出流水力计算	(309)
§ 7-5 泄水建筑物下游的消能与衔接	(316)
第八章 渗 流	(333)
§ 8-1 概述	(333)
§ 8-2 渗流基本定律	(334)
§ 8-3 地下河槽中的恒定渗流	(337)
§ 8-4 集水廊道与井	(342)
§ 8-5 求解渗流的其他方法	(352)
第九章 相似原理和量纲分析	(364)
§ 9-1 流动相似和相似原理	(364)
§ 9-2 单项力作用下的相似准则	(366)
§ 9-3 关于模型设计的几个问题	(368)
§ 9-4 量纲分析和 π 定理	(370)
附图 6-1 梯形和矩形断面明渠底宽求解图	(378)
附图 6-2 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图	(379)
附图 6-3 梯形、矩形和圆形断面明渠临界水深求解图	(380)
附图 6-4 梯形和矩形断面共轭水深求解图	(381)

第一章 绪论

§ 1-1 水力学的任务与发展简史

水力学是一门技术基础学科，它是力学的一个分支。水力学的任务是研究液体的平衡和机械运动的规律及其在工程实际中的应用。

水力学所研究的基本规律包括两大部分：一是关于液体平衡的规律，称为水静力学，二是关于液体运动与能量转换的规律，称为水动力学。物理学和理论力学的知识是学习水力学课程必要的基础。

水力学虽然以水为主要研究对象，但其基本原理同样适用于一般常见的液体和可以忽略压缩性的气体。在工农业生产的许多部门，如水利水电、给水排水、环境工程、土木工程、航运交通、水土保持、石油化工、能源工程等，都要碰到大量的与液体运动规律有关的工程技术问题，要解决这些问题，必须具备坚实的水力学知识。因此，水力学是高等院校不少专业的一门重要的技术基础课。

水力学随着生产实践的需要不断发展，从时间上可以追溯到很久以前，相传四千多年前的禹治水，表明我国古代就有一定规模的治水工作。到了秦代，公元前 256~210 年间，修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程，成为驰名中外的灌溉系统。那时，对水流运动规律的认识已具相当水平。

在欧洲，十五世纪后，水力学才开始萌芽，到十八世纪，水力学开始成为一门独立的学科。然而，当时以试验方法为基础的水力学和以严密的数学工具为基础的古典流体力学存在相互脱节情况，各自沿着互不联系的方向发展。水力学由于理论指导不足，其成果往往有局限性，难于解决复杂的问题，而古典流体力学则由于理论假设与实际不尽相符，并且常遇到求解上的数学困难，尚难用于解决实际问题。

在现代工业与新技术迅速发展的推动下，古典流体力学与实验力学的内容都在不断发生变化，走上了互相结合的道路。1904 年普朗特提出了边界层理论，古典流体力学开始与工程实际相结合，形成现代流体力学。同时，水力学得到现代流体力学基本理论的充实，变得更加完善和系统。加之相似原理和量纲分析理论的发展，水力学的理论基础更加坚实。随着现代量测技术的发展和计算机的应用，不同学科的互相渗透，水力学的内容也将不断地发展、充实和提高。

§ 1-2 水力学的研究对象与连续介质概念

自然界的物质一般有三种存在形式，即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。水作为一种流体，在运动过程中，表现出与固体有不同的特点。固体由于其分子间距很小，内聚力很大，所以它能保持固定的形状和体积，承受一定数量的拉力、压力和剪切力。流体则不同，由于其分子间距较大，内聚力很小，它几乎不能承受拉力，在微小剪切力作用下，流体很容易发生变形或流动，所以流体不能保持固定的形状。

液体与气体两者相比，液体分子内聚力却又比气体大得多，所以液体虽然不能保持固定的形状，但能保持固定的体积。气体不仅没有固定的形状，也没有固定的体积，极易膨胀和压缩，它可以任意扩散直到充满其占据的有限空间。液体的压缩性很小，在很大的压力下，其体积的缩小甚微。气体和液体的主要差别就是它们的可压缩程度不同，但当气流速度远比音速为小时，在运动过程中其密度变化很小，气体也可视为不可压缩，此时水力学的基本原理也同样可适用于气流。

组成液体的每个分子都在无休止地作不规则热运动，互相间经常发生碰撞，交换着能量与动量。因此，液体的微观结构和运动，无论在时间上或空间上，都充满着不均匀性、离散性和随机性。然而，人们用一般仪器所观测到的，或用肉眼所观察到的液体宏观运动却呈现了出明显的均匀性、连续性和确定性。微观运动的不均匀性、离散性和随机性，与宏观运动的均匀性、连续性和确定性，反映了液体运动的两个重要侧面。

如前述，水力学所研究的是液体的平衡及机械运动规律，因此没有必要直接考虑液体的分子结构，认为真实液体所占有的空间，完全由液体质点连续地无空隙地充满着，水力学所研究的液体的运动就是这种连续介质的连续流动。

所谓液体质点，是指微观上充分大而宏观上充分小的分子团，分子团的尺寸应该远远大于分子运动的尺度，使其包含大量分子，少数分子出入分子团，不影响该分子团物理量的稳定平均值。然而，分子团的尺寸还应该远远小于所研究问题的特征尺度，使得分子团的平均物理量不受其空间分布不均匀性的影响。因此，流体质点可近似地看成一个几何点。以液体的密度为例，如图 1-1 所示，当分子团的尺寸 ΔV 取得太小，分子数的增减，将使密度值产生随机波动。当分子团的尺寸取得太大，则物质分布的不均匀性将使密度产生相应的变化。只有当分子团的尺寸 ΔV 大于 ΔV_1 而小于 ΔV_2 ，即微观充分大而宏观充分小时，密度值才是稳定不变的。

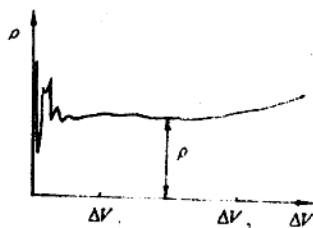


图 1-1

在标准状况下，每立方厘米的水中含有约 3×10^{23} 个水分子，即使小到 10^{-9}mm^3 的体积，其中也还有 3×10^{10} 个水分子，而 10^{-9}mm^3 的体积从宏观上看很小，微观上看却很大。在通常遇到的各种工程问题中，要求液体质点满足在宏观上充分小，微观上充分大的条件是不难的，因此，关于连续介质的概念是合理的。

根据连续介质的概念，液流中的一切物理量（如速度、压强、密度等）都可视为空间、坐标和时间的连续函数，这样，我们在研究液体运动规律时，就可以利用连续函数的数学分析工具，给水力学的研究带来极大的方便。需要指出，连续介质概念对某些特殊问题是例外的，例如火箭在高空极稀薄气体中的飞行等，此时，气体分子的平均自由程可同物体的特征长度相比拟，此时连续介质概念自然就不适用，而代之以采用微观的统计方法。

§ 1-3 液体的主要物理力学性质

外因是变化的条件，内因是变化的依据。液体受力作机械运动，一方面与外部因素有关，更重要的是取决于液体本身的内在物理力学性质。所以，在研究液体运动规律之前，应对液体的物理特性有所了解。和机械运动有关的液体的主要物理性质如下：

一、液体的质量与密度

质量是物质的基本属性之一，是物体惯性大小的量度。质量越大，惯性也越大。设物体的质量为 m ，加速度为 a ，则惯性力为

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

式中负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

每一个物理量都包括有量的种类和量的数值。量的种类习惯上称为量纲，为计量所选定的标准量称为单位。本书采用国际单位制 (SI)，规定长度、质量和时间为基本量。相应的基本量纲：长度为 (L) 、质量为 (M) 、时间为 (T) 。力为导出量，量纲为 (MLT^{-2}) 。根据国际单位制规定，质量的单位用千克或公斤 (kg)，力的单位用牛顿 (N)。一牛顿的力定义为：在一牛顿力的作用下，质量为一千克的物体得到 1 米/秒^2 的加速度，即 $1N = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。

我国过去习惯上使用工程单位制，与国际单位制不同的是，它规定长度、时间和力为基本物理量，其量纲为 (L) 、 (T) 、 (F) ，力的单位用公斤力 (kgf) (或称千克力)。在 1 千克力 作用下，质量一千克的物体得到 9.8 米/秒^2 的加速度，即 $1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2$ 。质量为导出量，其量纲为 (FT^2L^{-1}) ，单位为千克力·秒²/米 ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$)，称为质量工程单位。

显然， $1 \text{ 千克力} = 9.8 \text{ 牛顿}$ ， $1 \text{ 质量工程单位} = 9.8 \text{ 千克}$ 。

密度是指单位体积的质量。液体的密度常以符号 ρ 表示。对于均质液体，设质量为 M ，积积为 V ，则其密度为

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

密度的量纲为 (M/L^3) ，单位为公斤/米³ (kg/m^3)。液体的密度随温度和压强而变化，但这种变化很小，因此，水力学中常把液体的密度视为常数。例如水的密度，实用上就采用一个标准大气压下，温度为 4°C 时的最大密度值作为计算值，其数值为 1000 千克/米^3 (kg/m^3)。

二、液体的重量与重度

地球对物体的引力称为重力，用 G 表示。设物体的质量为 M ，重力加速度为 g ，则所受重力的大小为

$$G = Mg \quad (1-3)$$

重力的单位为牛顿 (N)。重力加速度 g 随纬度及高度变化，但因变化甚微，水力学中常将其视为常数： $g = 9.8\text{m/s}^2$ 。

液体单位体积所具有重量称为容重或重度，以 γ 表示。对某一重量为 G ，体积为 V 的均质液体，其容重为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4)$$

由公式 (1-3) 和 (1-4) 可得

表 1-1

不同温度下水的物理性质(一个标准大气压)

温度 t	容重 γ (KN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	粘性系数 μ ($10^{-3}\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)	运动粘性系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 K (10^9N/m^2)	表面张力系数 σ (N/m)	汽化压强 (KN/m^2)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756	0.60
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749	0.87
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742	1.18
15	9.789	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735	1.70
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728	2.34
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720	3.17
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712	4.24
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696	7.38
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679	12.16
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662	19.91
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644	31.16
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626	47.34
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608	70.10
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589	101.33

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-5)$$

容重的量纲为 $(ML^{-2}T^{-2})$ 或 (FL^{-3}) , 单位为牛顿/米³ (N/m^3) 或千牛顿/米³ (kN/m^3)。液体容重随温度和压强而变化, 由于变化甚微, 工程上一般将其视为常数。水的容重常采用的数值为 $\gamma = 9800 N/m^3$ 。不同温度下水的容重值见表 1-1。

三、粘滞性与粘滞系数

当液体处在运动状态时, 若液体质点之间存在着相对运动, 则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动, 这种性质称为液体的粘滞性, 此内摩擦力又称为粘滞力。由于粘滞力的存在, 液体在运动过程中因克服内摩擦力而做功, 所以液体的粘滞性是液体中发生能量损失的根源。

图 (1-2) 是当液体沿某一平直边界作层状流动时, 位于边界法线 y 上各点的流速分布情况。显然, 靠近边界上由于分子附着力的作用, 液体质点贴附于槽底上静止不动, 流速等于零, 离边界越远, 流速 u 越大。若距固体边界 y 处的流速为 u , 在相邻层 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$, 由于两相邻液层的流速不同, 在两流层之间将成对地产生内摩擦力。下面一层液体对上而一层液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力, 力图阻滞其流动, 而上而一层液体对于下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的摩擦力, 产生加速其流动的趋势。这两个摩擦力大小相等、方向相反, 都具有抗拒其相对运动的性质。

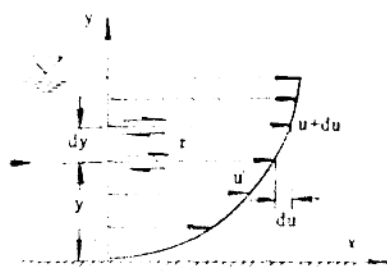


图 1-2

实验证明, 相邻液层接触面上单位面积所产生的内摩擦力 τ 的大小, 与两液层间速度差 du 成正比, 与两液层之间距离 dy 成反比, 同时与液体的性质有关。即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

若两液层的接触面积为 A , 则其内摩擦力为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式 (1-6) 和式 (1-7) 都是液体内摩擦定律的表达式, 称为牛顿内摩擦定律。

式中 μ 是随液体种类不同的比例系数, 称为动力粘性系数。两液层流速差与其距离的比值 $\frac{du}{dy}$ 又称为流速梯度。 μ 的大小表征粘滞性的强弱, 粘性大的液体 μ 值大, 粘性小的液体 μ 值小。 μ 的量纲为

$$[\mu] = [\tau / \frac{du}{dy}] = [\frac{F}{L^2}] [\frac{L}{T}] = [FTL^{-2}]$$

μ 的单位为牛顿·秒/米² ($N \cdot s/m^2$) 或帕斯卡秒 (Pa.s)。

液体的粘性还可以用另一种形式的粘滞性系数 ν 来表示, 它是动力粘性系数 μ 和液体密度 ρ 的比值

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

ν 的量纲是

$$[\nu] = \left[\frac{\mu}{\rho} \right] = \left[\frac{FTL^{-2}}{ML^{-3}} \right] = \left[\frac{MLT^{-2}TL^{-2}}{ML^{-3}} \right] = [L^2T^{-1}]$$

由于 ν 的量纲仅仅具有运动量的量纲，故称 ν 为运动粘性系数，它的单位为米²/秒 (m^2/s) 或厘米²/秒 (cm^2/s)。

习惯上把 $1cm^2/s$ 称为 1 “斯托克斯”。

从微观上讲，粘滞性来源于分子的内聚力和分子热运动产生的动量交换，因此，液体的粘性系数与液体的种类有关，并随压强和温度而变，但随压强变化关系甚微，对温度的变化较为敏感。

对于水， ν 可按下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

式中 t 为水温，以℃计， ν 以厘米²/秒 (cm^2/s) 计。表 1-1 列出了水在不同温度时的 ν 值和 μ 值。

式 (1-6) 中的流速梯度 $\frac{du}{dy}$ ，一方面表示流速变化的强弱，另一方面它还代表了液体微团的剪切变形速度。如图 (1-3) 所示，取一矩形流体微团来进行研究。设该微团经过 dt 时段后从 ABCD 运动至新位置 A' B' C' D'，因液层 2-2 与液层 1-1 存在流速差 du ，流体微团除位置改变引起平移运动外，还伴随着形状的改变，由原来的矩形变成平行四边形，也就是产生了剪切变形，设剪切变形量为 $d\theta$ ，则有

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

$$\text{故} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

所以内摩擦公式 (1-6) 又可表达为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

上式表明液体中的内摩擦力（切应力）与剪切变形速度成正比。所以液体的粘滞性可视为液体抵抗剪切变形的特性。

切应力与流速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、各种

油类等低分子流体。这时 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 之间存在线性关系，如图 (1-4) 中的 A 线。在温度不变的条件下，这类流体的 μ 值不变。凡与牛顿内摩擦定律偏离的流体都属于非牛顿流体。B 线为一种非牛顿流体，叫理想宾汉流体，如泥浆、血浆等，这种流体只有在切应力

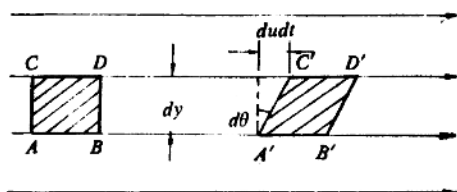


图 1-3

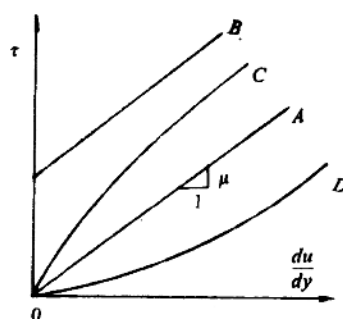


图 1-4

达到一定值时才开始剪切变形, 但变形率是常数。C 线是另一种非牛顿流体, 叫做伪塑性流体, 如尼龙、橡胶的溶液、颜料、油漆等, 其粘滞系数随剪切变形速度的增加而减小。D 线称膨胀性流体, 如生面团、浓淀粉糊等, 其粘滞系数随剪切变形速度的增加而增加。所以在应用内摩擦定律时, 应注意其适用范围。

四、压缩性与压缩系数

液体受压后体积要缩小, 压力撤除后能恢复原状, 这种性质称为液体的压缩性或弹性。液体压缩性的大小是以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来表示。

若某一液体在承受压强为 p 的情况下体积为 V , 当压强增加 dp 后, 体积的改变值为 dV , 其体积压缩系数 β 可用液体体积的相对压缩值 $\frac{dV}{V}$ 与压强的增值 dp 的比值表示

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-11)$$

β 值越大, 表明越易压缩。因液体的体积随压强的增大而减小, 所以 dV 与 dp 的符号始终相反。为保持 β 为正数, 在上式右端加一负号。 β 的单位为 $\text{米}^2/\text{牛顿}$ (m^2/N)。很显然, 在压缩前后, 液体的质量 m 是不变的, 即 $m = \rho V = c$, $dm = \rho dV + V d\rho = 0$, 所以 $\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$ 。液体体积的相对压缩值与液体密度的相对增加值相等, 故式 (1-11) 也可写成

$$\beta = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dp} \quad (1-12)$$

液体的体积弹性系数 K 是 β 的倒数

$$K = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (1-13)$$

K 值愈大, 表示液体愈不易压缩, $K \rightarrow \infty$, 表示绝对不可压缩。 K 的单位为 $\text{牛顿}/\text{米}^2$ (N/m^2)。

不同种类的液体具有不同的 β 值和 K 值, 同一种液体的 β 值和 K 值也随压强和温度而略有变化, 但这种变化甚微, 一般可视为常数。水的体积弹性系数 $K = 2.1 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。也就是说, 每增加一个大气压, 水的体积相对压缩值约为两万分之一。对一般工程问题, 可以认为水是不可压缩的。这在实用上是足够准确的。但在压强变化过程非常迅速的水力现象中, 如水中爆炸和水击问题, 就需要考虑水的压缩性。

五、表面张力与表面张力系数

表面张力是自由表面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡, 使自由面上液体分子受有极其微小的拉力, 这种拉力称表面张力, 这在物理学中从分子力的观点已作了说明。表面张力仅在自由表面存在, 液体内部并不存在, 所以它是一种局部受力现象。由于表面张力很小, 一般说来对液体的宏观运动不起作用, 可以忽略不计, 只在某些特殊情况下, 如研究微小水滴和汽泡的形成与运动、大曲率薄层水舌运动、水在细管或土壤孔隙中的运动等情况, 才显示其影响。

表面张力的大小, 可以表面张力系数 σ 度量。表面张力系数是指在自由面单位长度

上所受拉力的数值，单位为牛顿/米 (N/m)。σ 的数值随液体种类、温度和表面接触情况的变化而变化，对空气与水接触的水面，在 20℃ 时，σ 值为 0.073 N/m，空气与水银接触面，在 20℃ 时 σ 值为 0.54 N/m。

在小直径细管中，液体的表面张力十分明显，如图 1-5 所示。当液体的内聚力小于它与管壁材料的附着力，使水面向上弯曲，表面张力将使液体上升。反之，当液体的内聚力大于它与管壁的附着力，表面张力将使液柱下降。假设液面与固体壁面的接触角为 θ，则可根据沿管壁圆周上的表面张力的垂直分力与升高的液柱

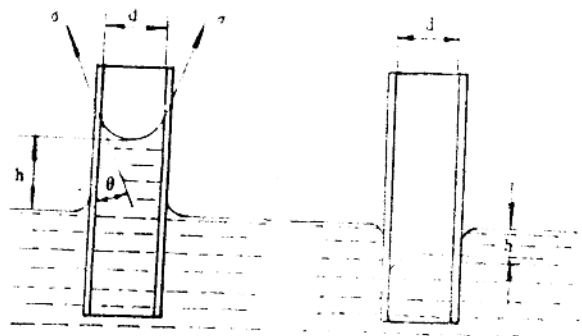


图 1-5

重量相等，即： $\pi d \sigma \cos \theta = \gamma h \pi d^2 / 4$ ，得到毛细管上升高度为： $h = 4 \sigma \cos \theta / \gamma d$ 。说明，液柱上升或下降高度与管径成反比，与液体和管材的种类及温度有关。一般情况下，水与玻璃的接触角 $\theta = 0^\circ$ ，水银与玻璃的接触角 $\theta = 139^\circ$ ，这时玻璃管中水面高出容器水面的高度为

$$h = \frac{29.8}{d} (\text{mm}) \quad (1-14)$$

玻璃管中汞面低于容器中汞面的高度为

$$h = \frac{10.15}{d} (\text{mm}) \quad (1-15)$$

上而两式中 d 为玻璃管的内径，以毫米计。

六、汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散变为蒸汽，这一过程称为汽化。它的逆过程为凝结。实际上，汽化和凝结现象在液体中同时存在。当这两个过程达到动力平衡时，这时液面的压强称为饱和蒸汽压强或汽化压强。温度不同，液体分子具有不同的动能，汽化压强值也不同，总的规律为汽化压强随温度的升高而增大，见表 1-1。

当液面压强为一个大气压时，温度升高至 100℃，水会沸腾，急剧汽化放出大量气体。当水流中局部地区所受压强降低到相应温度的汽化压强时，水流内部由于汽化也会放出大量气泡。这一方面破坏了水流的连续性，另一方面，当水流至压强较高区，气泡的溃灭将产生极大的瞬时冲击力，有可能造成建筑物表面材料的空蚀破坏。

以上所介绍的液体主要物理性质，都不同程度地决定和影响液体的运动，一般说来，在水力学中重力、惯性力、粘滞力对水流运动起着重要作用，弹性力、表面张力和汽化压强等只对某些特殊的水流运动产生影响。

实际液体的物理性质是很复杂的，尤其是粘滞性对液流的影响更是水力学研究中的一

个关键问题，液体的粘滞性所引起的能量散逸，给液体运动的数学描述和处理带来很大的困难，为了简化问题，便于分析，水力学中引入了“理想液体”的概念。所谓理想液体，主要是指没有粘滞性的液体，即 $\mu=0$ 。这样，在解决较复杂的水流问题时，为了简化分析，可先不考虑液体的粘滞性影响，按理想液体进行分析，求得其运动规律，借以揭示实际液体运动的概貌和趋势，然后再根据具体情况，考虑粘滞性的影响加以修正。这是水力学中一个重要的研究方法。对某些粘滞性不起主要作用的问题，忽略粘滞性的影响所得结果，能相当精确地反映实际液流的情况。

§ 1-4 作用于液体上的力

作用于液体上的力，按其物理性质来分，有重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等。如果按其作用特点，这些力又可分为表面力与质量力两大类。

一、表面力

表面力作用于所取液体的表面上，与受作用的表面积成比例。例如固体边界对液体的摩擦力，边界对液体的反作用力，一部分液体对相邻的另一部分液体产生的水压力都属于表面力。表面力又可分为垂直作用面的压力和平行作用面的切力。表面力的大小除用总作用力来度量外，也常用单位面积上所受的力（即应力）来度量。与作用面正交的应力称为压应力或压强，与作用面平行的应力称为切应力。

设液体的受力面积为 ΔA ，它所受的压力为 ΔP 、切力为 ΔT ，则当此面积缩小为一点时，即定义为该点的压强 p 和切应力 τ

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-16)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-17)$$

ΔP 与 ΔT 的单位是牛顿 (N)，简称牛。 p 及 τ 的单位是牛顿 / 米² (N/m²)，或称为帕斯卡 (Pa)，简称帕。

二、质量力

质量力是作用于每个液体质点并通过液体的质量而起作用的力。其大小与质量成比例。如重力、惯性力就属于质量力。在均质液体中，质量与体积成比例，故质量力又称体积力。

单位质量液体所受的质量力，称为单位质量力，以符号 f 表示。设均质液体的质量为 M ，所受总的质量力为 F ，则单位质量力为

$$f = \frac{F}{M} \quad (1-18)$$

若总的质量力在坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ，则单位质量力 f 在相应坐标上

的投影为 X 、 Y 、 Z ，则

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{M} \\ Y &= \frac{F_y}{M} \\ Z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

单位质量力具有和加速度一样的量纲 $[LT^{-2}]$ 。如果液体只受到地球引力的作用，且取 z 轴铅直向上， x 、 y 平面为水平面，则单位质量力在 x 、 y 、 z 轴向上的分量

$$\begin{aligned} X &= 0 \\ Y &= 0 \\ Z &= \frac{-Mg}{M} = -g \end{aligned} \quad (1-20)$$

式中负号表示重力加速度 g 与坐标轴 z 方向相反。

例 1-1. 一面积为 $A=1\text{m}^2$ 的平板，在拖力 F 的作用下在水面上以速度 $U=2\text{m/s}$ 作水平运动（如图 1-6）。已知水深 $h=0.01\text{m}$ ，水温为 15°C ，求拖动力 F 为多少？

解：位于平板表面的流体吸附于板面上，故与平板相接触的流体以速度 $U=2\text{m/s}$ 运动，而槽底流速则为零，两平板间的流速分布呈直线关系： $u=U\frac{y}{h}$ ，为维持这一运动，必须于平板施加一水平力以便与流体内部的粘性阻力相抗衡。

已知水温为 15°C 时的动力粘性系数 $\mu=1.139\times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，流速梯度 $\frac{du}{dy}=\frac{U}{h}$
 $=\frac{2}{0.01}=2001/\text{s}$ ，由牛顿内摩擦定律：

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \frac{du}{dy} = 1.139 \times 10^{-3} \times 2001 \\ &= 0.2278 \text{N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

平板 A 所受的拖力 F 为：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = 0.2278 \times 1 = 0.2278 \text{N}$$

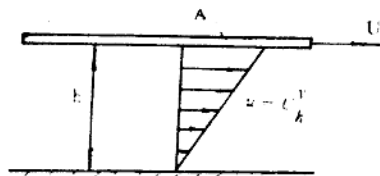


图 1-6

例 1-2. 已知如图 (1-7) 所示的明渠水流，其流速分布可以下式表示：

$$U_x = C(yh - \frac{y^2}{2})$$

试求粘性切应力的分布规律。

解：根据牛顿内摩擦定律，切应力为

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy} = c\mu(h - y)$$

因 c 、 μ 、 h 均为常数，可知粘性切应力沿水深呈

直线分布。当 $y=0$ ，即渠底处， $\tau=c\mu h$ ，当 $y=h$ ，即水面， $\tau=0$ ，如图 (1-7) 所示。

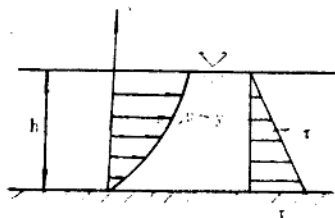


图 1-7

习 题

1-1 已知在 10°C 情况下, 水、空气和水银的密度分别为: $\rho_{\text{水}}=999.7 \text{ 千克/米}^3$, $\rho_{\text{空气}}=1.24 \text{ 千克/米}^3$, $\rho_{\text{汞}}=13570 \text{ 千克/米}^3$, 求它们相应的重度。

1-2 已知水在 20°C 时动力粘性系数 $\mu=1.002 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 求其运动粘性系数 ν 。

1-3 根据质量不变原理, 问当水温由 5°C 升至 100°C , 水的体积比原有体积增加百分之几?

1-4 已知圆管中水流的流速分布公式为:

$$u = c \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

(式中 c 为常数)

试求水流粘滞切应力分布公式并绘出切应力分布图。



题 1-4 图

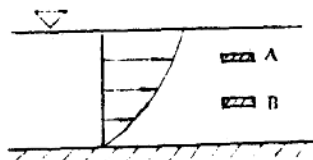
若 $c = 0.2 \text{ m/s}$, 试求水温为 15°C 时, $\frac{r}{R} = 0.1, 0.5, 1.0$ 处的切应力值。

1-5 水流的流速分布如图所示, 试标绘出水体 A、B 的上下两面所受的粘滞切应力的方向, 并定性比较其大小。

1-6 下图中绘出三种水流运动情况:

(a) 静止水体, (b) 明渠水流, (c) 平面弯道水流。

试分析水体 A 受到哪些表面力和质量力作用?



题 1-5 图



题 1-6 图

第二章 水静力学

水静力学研究液体处于静止状态时的力学平衡规律及其实际应用。液体的静止（或平衡）状态有两种：一是指液体对于地球没有相对运动，例如水库和蓄水池中静止不动的水。二是指液体对地球虽有运动，但液体与容器之间以及液体质点之间不存在相对运动，例如作等加速运动的车厢中所盛液体，等角速旋转容器中的液体，这一情况也称为相对平衡或相对静止。

静止状态下的液体，由于各质点之间没有相对运动，流体的粘性表现不出来，内摩擦力等于零，所以液体与边壁之间以及液体质点之间作用的表面力只有压力，本章主要讨论静水压强的特性，建立液体的平衡微分方程，探讨静水压强的分布规律以及静水总压力的计算。水静力学是解决工程中水力荷载问题的基础，同时也是今后学习水动力学的必备知识。

§ 2-1 静水压强及其特性

一、静水压力与静水压强

静止液体作用在与之接触的表面上上的水压力称为静水压力，常以字母 P 表示。在图（2-1）所示的平板闸门上，取微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的静水压力为 ΔP ，则 ΔA 面上单位面积所受的平均静水压力为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

当 ΔA 无限缩小趋于 K 点时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限定义为 K 点的静水压强

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-2)$$

静水压力 P 的单位为牛顿（N）或千牛顿（kN），静水压强 p 的单位为牛顿/米²（N/m²）或千牛顿/米²（kN/m²），牛顿/米² 又称为帕斯卡（Pa）。

二、静水压强的特性

静水压强有两个重要的特性：

1. 静水压强的方向与受压面垂直并指向受压面

在静止液体中取出一块液体 M ，如图（2-2）所示。今用 $N-N$ 面将其分割成 I、II 两部分，若取出第 II 部分液体作为脱离体，并在其上任取一点 A ，假如其所受的静水压强 p 是任意方向，则 p 可分解为法向应力 p_n 与切向应力 τ 。由于静止液体不能承受任何

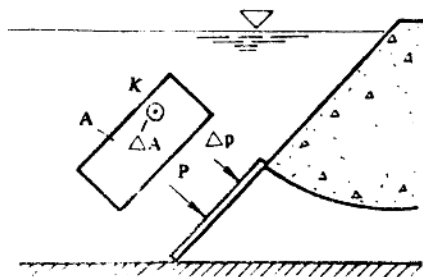


图 2-1

剪切应力, τ 的存在必然破坏液体的静止状态, 故必有 $\tau=0$, 也即 $\alpha=90^\circ$, p 必须垂直于作用面。同样, 如果压强 p 不是指向作用面, 而是指向作用面的外法线方向, 则液体将受到拉力, 平衡也要受到破坏。

以上讨论表明, 静水压强只能是垂直并指向作用面, p 为压应力。

2. 任一点静水压强的的大小和受压面的方向无关, 或者说作用于同一点各方向的静水压强大小相等。

设在静止液体内分割出一块无限小的四面体 ABCD, 见图 (2-3), 斜面 DBC 的方向任意选取, 为简单起见, 让四面体的三个棱边与坐标轴平行, 各棱边长为 Δx 、 Δy 、 Δz 并让 z 轴与重力方向平行。四面体四个表面上受有周围液体的静水压力, 因四个作用面的方向各不相同, 如果能证明, 微小四面体无限缩小至 A 点时, 四个作用面上的静水压强大小都相等, 则静水压强的第二个特性就得到了证明。为此目的, 需要研究微小四面体在各种力作用下的平衡问题。

因为微小四面体是从静止液体中分割出来的, 它在所有外力作用下必处于平衡, 作用于微小四面体的外力包括两部分, 一部分是四个表面上的表面力, 即周围液体作用的静水压力; 另部分是质量力。图 (2-3) 中没有把质量力画出来。

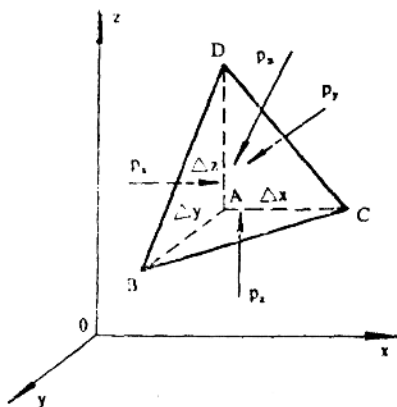


图 2-3

因为微小四面体是从静止液体中分割出来的, 它在所有外力作用下必处于平衡, 作用于微小四面体的外力包括两部分, 一部分是四个表面上的表面力, 即周围液体作用的静水压力; 另部分是质量力。图 (2-3) 中没有把质量力画出来。

以 p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n 分别表示 ABD、ACD、ABC 及 BCD 各面上的平均压强; P_x 、 P_y 、 P_z 和 P_n 分别表示相应面上的总压力, 则有

$$P_x = \frac{1}{2} \Delta y \cdot \Delta z \cdot p_x$$

$$P_y = \frac{1}{2} \Delta z \cdot \Delta x \cdot p_y$$

$$P_z = \frac{1}{2} \Delta x \cdot \Delta y \cdot p_z$$

$$P_n = \Delta s \cdot p_n \quad (\Delta s \text{ 为斜面 } BCD \text{ 的面积})$$

令四面体的体积为 ΔV , 由几何学可知, $\Delta V = \frac{1}{6} \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$. 假定作用在四面体上单位质量力在三个坐标方向的投影为 X 、 Y 、 Z , 总质量力在三个坐标方面投影为

$$F_x = \frac{1}{6} \rho \Delta x \Delta y \Delta z X$$