

高等学校教材

水力学

蒋觉先 主编



高等教育出版社

高等学校教材

水 力 学

樊纪湘 方 平 吕文舫 包天安 编
蒋觉先 主编

高等教育出版社

(京)112 号

内 容 简 介

本书适用于土建类道桥、工民建、地下建筑等专业(参考学时范围 50~70 学时)。本书编写中采纳了 1989 年土建类教材会议中许多专家的建议和吸取本校多年来教学中的实践经验。本书内容包括:静水力学、动水力学的三大方程、水流阻力、管流、明渠恒定流和渗流。

本书力求深入浅出,便于自学,内容深广度适宜,说理清晰。在推导和计算方面注意了少学时专业的特点,力求简明实用,并注意同土建类不同专业设计和施工实用情况的衔接。编排上还考虑到土建类不同专业的实际情况和要求有所不同,对某些章节宜有取舍的余地,另外还增设了一章专题。本书可供土建类本科大学生及专科学生用作教材,也可供有关工程技术人员参考。

高等学校教材

水 力 学

樊纪湘 方 平 吕文舫 包天安 编

蒋觉先 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

四川省金堂新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 8.875 插页 2 字数 213 000

1993年3月第1版 1993年5月第1次印刷

印数 0 001—3 149

ISBN 7-04-004075-1/TB·210

定价 3.70 元

序

本书为土建类少学时各类专业而编。适用于环境监测、公路、交通、工业与民用建筑结构、土建、桥梁、水文地质等专业，学时数为 50 左右。

本书前身为同济大学少学时水力学讲义，系根据国家教育委员会的土建类少学时水力学基本要求初稿改编而成。在编写过程中，注意到确保基础理论，努力贯彻理论联系实际的原则，并考虑到水力学在土建工程中的应用，以及适当反映本学科的先进科学水平。

在编写过程中考虑到各专业的不同需求和学时数少的特点，在具体教学中任课教师有按各专业的实际情况和要求，对某些节、甚至是章有取舍的余地。为此，在本书中单独设置了第十章（专题），并对某些章中的节和目的安排没有按照通常的做法。

在编写过程中考虑到少学时水力学大都为非重点或非主干课，对习题的数量和难度作了一定的控制，能满足少学时水力学的的基本要求。

本书由哈尔滨建工学院屠大燕教授及成都科技大学赵文谦教授审阅以及水力学课程指导小组一些专家的热情指导和鼓励，吸取了他们许多宝贵的意见和建议，特此致谢。

本书由蒋觉先主编，参加编写的有樊纪湘、方平、吕文舫和包天安。

由于编者水平有限，更缺乏为土建类少学时各专业而编写水

力学的经验, 缺点和错误在所难免, 恳请读者批评指正。

编 者

1991 于上海

目 录

序.....	1
第一章 绪论.....	1
§ 1-1 水力学的任务	1
§ 1-2 液体和连续介质的概念	3
§ 1-3 液体的主要物理性质	4
§ 1-4 作用在液体上的力	9
第二章 水静力学.....	11
§ 2-1 静水压强及其特性	11
§ 2-2 重力作用下水静力学基本方程	15
§ 2-3 静水压强的表示、测压管水头、单位势能、压强分布图	18
§ 2-4 静水压强的量测	25
§ 2-5 作用在平面上的静水总压力	29
§ 2-6 作用在曲面上的静水总压力	36
§ 2-7 液体平衡微分方程	40
习题	45
第三章 动水力学.....	49
§ 3-1 分析液体运动的两种方法、迹线和流线	49
§ 3-2 液体运动的分类和基本概念	53
§ 3-3 理想液体的运动微分方程——欧拉运动方程	57
§ 3-4 连续性微分方程	59
§ 3-5 恒定总流连续性方程	60
§ 3-6 恒定总流能量方程	62
§ 3-7 能量方程的应用、毕托管、文丘里管	70
§ 3-8 恒定总流动量方程	77
习题	84
第四章 水流阻力和水头损失.....	90

§ 4-1	雷诺实验和两种流态	90
§ 4-2	均匀流沿程水头损失及其与切应力的关系	94
§ 4-3	圆管中的层流运动	97
§ 4-4	紊流运动	98
§ 4-5	沿程水头损失	104
§ 4-6	局部水头损失	114
习题		123
第五章	孔口、管嘴和有压管流	125
§ 5-1	薄壁孔口的恒定出流	125
§ 5-2	管嘴的恒定出流	130
§ 5-3	孔口(或管嘴)的非恒定出流	133
§ 5-4	恒定管流水力计算概念	134
§ 5-5	短管水力计算	136
§ 5-6	短管水力计算的应用	139
§ 5-7	长管的水力计算	142
§ 5-8	管网的水力计算基础	154
§ 5-9	水击	159
习题		164
第六章	明渠均匀流	168
§ 6-1	概述	168
§ 6-2	明渠均匀流的形成条件和水力特征	169
§ 6-3	明渠均匀流的水力计算	171
§ 6-4	其他几种过水断面的型式和计算	176
习题		182
第七章	明渠恒定非均匀流	184
§ 7-1	概述	184
§ 7-2	断面单位能和临界水深	187
§ 7-3	缓流和急流、临界底坡、弗劳德数	192
§ 7-4	棱柱形渠道恒定渐变流动水面曲线的定性分析	196
§ 7-5	跌水和水跃	200
§ 7-6	分段求和法计算水面曲线	210

习题	214
第八章 堰流	216
§ 8-1 概述	216
§ 8-2 宽顶堰	217
§ 8-3 薄壁堰和实用断面堰	223
§ 8-4 小桥涵孔径计算简介	227
习题	231
第九章 地下水动力学	233
§ 9-1 概述	233
§ 9-2 渗流定律	235
§ 9-3 单井	238
§ 9-4 势流叠加原理和井群	244
§ 9-5 关于井的若干说明	249
§ 9-6 潜水含水层的地下水运动和集水廊道	251
习题	255
第十章 专题	257
§ 10-1 相似原理及水力模型试验基础	257
§ 10-2 边界层和绕流阻力	264
§ 10-3 环状管网水力计算基础	269
习题	273
参考文献	275
附录 1(a) 梯形断面渠道均匀流水深求解图	
附录 1(b) 梯形断面渠道底宽求解图	
附录 2 梯形、矩形、圆形断面渠道临界水深求解图	

第一章 绪 论

§ 1-1 水力学的任务

从力学的角度看,液体也可以分成若干种类,其力学性质各有差异,如油漆、血液和水的力学性质有较多的不同之处。

水力学是研究以水为代表的液体的平衡和机械运动的规律及其在工程中的应用的学科。

还有一门学科叫流体力学,既研究气体也研究液体的机械运动。它的特点是着重从严格的数学推论,尽可能获得实际工程问题中所要求的精确解和普遍解。

水力学的不少基本理论和流体力学相同,然而它更紧密地同工程相结合,常在工程所允许的精度范围内,力求简化地解决工程实际问题。在依靠模型实验数据的基础上,水力学常常采用半经验半理论的公式,或采用表格、贯线图 etc 来代替繁琐的计算公式。

水力学在土建类专业中也用得很多,兹举例如下:管道中液体的运动,有输送清洁水、泥浆水等;河道中水同建筑物之间的相互作用,有水同桥墩、水同护岸、水同码头之间的相互作用;又如水力设备和构筑物,有大型泵站的进水池、水力自控设备、涵洞、过水路堤、防波堤等;水在多孔介质中的运动,有地下水的运动、土坝渗流;另外在环境保护方面,有水体受污染后的自净扩散等问题。

水力学的发展主要取决于生产发展的需要,在古代,抗洪和农

业生产所需是主要的,很早就有大禹治水的传说,在浙江绍兴的禹陵,一直是纪念和祭祀大禹的地方。我国在公元前 256~210 年修建了著名的都江堰、郑国渠、灵渠等为灌溉、航行所需。其中都江堰举世闻名,沿用至今。在古埃及、希腊也有灌溉渠等水利工程。

在 16、17 世纪前,为了生产和生活的需要累积了不少有关水力学的知识,有不少创造。如我国的记时工具“铜壶滴漏”和“水轮式记时装置”,前者已有 2000 多年的历史,两者均被收入世界最有名的博物馆。各种水磨在当时国内外都有使用。又如唐代前,我国就发明了水轮-提水联合装置。

可惜的是在很长的时间里很少有人发表水力学方面的著作,比较有名的著作中有公元前 250 年阿基米德发表的“论浮体”,1452~1519 年达·芬奇发表的“论水的流动和水的测量”一文。1612 年伽利略发表了论浮体基本定律的学说,我国明代潘季驯提出的“筑堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治水思想包含了一定的水力学规律。

18 世纪起水力学的基础理论得到了发展,1738 年伯努利发表了能量方程,1769 年欧拉提出了液体运动的解析方法,1836 年麦利尼科夫出版了一本水力学教科书“实用水力学基础或各种情形下水运动及其冲击与阻力的作用”。

19 世纪起,特别是 20 世纪以来由于生产的迅猛发展,水力学的发展也进入了新的时期。1904 年德国普朗特提出了边界层理论,1883 年英国雷诺通过实验明确地证实了液体运动存在着层流和紊流两种流态,前苏联巴夫洛夫斯基全集是公认的水力学巨著。电子计算机的出现使过去许多无法计算的课题得到解决和发展。现在计算流体力学已成为一个新的学科分支。现代仪器的发展,诸如激光、超声波、同位素等使许多过去没法研究或深入的课题得到解决或深化。近二十年来不同学科的互相渗透,发展和派生出

一些边缘性分支和学科,如电磁流体力学、随机水力学、环境水力学等。同时流体力学同水力学之间的差别在一定程度上缩小了,有的人已建议把水力学这一课程的名称改为流体力学。

§ 1-2 液体和连续介质的概念

物质存在的一般形式有固体、液体和气体三种,液体和气体统称为流体,两者在力学上有许多相似之处,特别是在速度比音速小得多的情况下。两者也有许多不相同之处。本教材只讨论以水为代表的液体平衡和运动规律。在没有讨论液体的力学规律以前,有必要从力学角度对液体本身有一个概念性的了解。

液体在容器中能保持一定的体积,具有自由表面。但极易流动,也就是几乎不能承受拉力,在静止状态下不能抵抗微小的切应力,当受到剪切力时液体要发生连续的变形和流动。液体能承受压力,受压后会有压缩变形,但压缩率是十分小的,在绝大多数的场合里,可以忽略不计。

液体也是由分子所组成的,从其结构特点来看,一立方厘米的液体中有 3×10^{23} 个液体分子,分子间的距离平均约为 31×10^{-8} 厘米。每个分子在相对(暂时)平衡的位置上振荡,每次约 10^{-12} 秒。由于分子间的距离是如此的小,在一个很小的体积内含有大量的分子。虽然单个分子的运动有明显的随机性,然而大量的分子的平均统计特征值,包括所体现出来的力学性能如速度、压强等是具有稳定性的,可以用连续函数这一数学工具来表达。也就是说由于分子间隙很微小,同工程所研究的尺度相比,前者属于微观,后者属于宏观问题。于是引入了连续介质的假定,即假定被液体所占有的空间内,没有空隙存在,液体是连续的介质,它所有的运

动要素都是连续分布的。另外,还认为液体是均质、各向同性的物质。这些假定使研究工作大为简化。

在本书中的一切论述都是以液体为连续介质的假定为基础。顺便提及对大多数的气体运动也采用了连续介质的假定。

§ 1-3 液体的主要物理性质

物体受力而运动,但具体的运动形态、特性和量的关系与物体的物理特性有关。液体也是这样。本书从研究以水为代表的液体的机械运动需要出发,引入一些有关的物理特性如下:

(一) 密度和容重

密度是单位体积液体所含有的质量,对于均质液体来讲,用符号 ρ 表示

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

式中: M 为质量,以公斤(kg)计; V 为体积以米³(m³)计。

容重是单位体积液体所具有的重量,对于均质液体来讲,用符号 γ 表示

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2a)$$

式中: G 为液体的重量,以牛顿(N)计。

在非均质液体中,密度和容重 γ 都是坐标的函数,因此式(1-1a)和(1-2a)均需用极限的方式来表示,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-1b)$$

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-2b)$$

密度同容重的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中: g 为重力加速度, 世界各地的重力加速度是不相等的, 在本书中采用 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

密度与温度和压强有关, 表 1-1 表示在一个标准大气压作用下, 水的密度和温度之间的关系, 在常温下, 则取 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

表 1-1 标准大气压下水的密度与温度之间的关系

温 度 °C	密 度 kg/m ³	温 度 °C	密 度 kg/m ³	温 度 °C	密 度 kg/m ³
0	999.9	25	997.0	70	977.8
5	1000.0	30	995.7	80	971.8
10	999.7	40	992.2	90	965.3
15	999.1	50	988.0	100	958.4
20	998.2	60	983.2		

(二) 粘滞性和粘滞性系数

液体在流动时断面上的流速分布是不均匀的, 如在顺直的河道中, 河中心水深流急, 河边水浅流速小。又以管中液体运动为例, 在管轴处的流速最大, 愈近管壁, 流速愈小, 这主要是由于液体同固体壁间的摩擦力和液体本身具有一种被称为粘滞性或粘性的物理特性所造成的。

液体的粘性是指液体抵抗剪切变形速率的能力, 在静止时液体的粘性不显示出来。为抵抗剪切变形, 液体与固体壁之间和液体内部出现成对的摩擦力, 起阻止变形和阻止流动的作用, 并使流动变得复杂。

牛顿在 1686 年根据试验提出了液体的内摩擦定律, 后被他人所证实, 该定律表明, 在角变形速率一定的情况下, 剪应力(即摩擦力)与粘滞性成正比。牛顿内摩擦定律的数学表达式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中: τ 为剪应力, 又称为粘滞力或粘性力, 以 N/m^2 计; $\frac{du}{dy}$ 为角变形速率; μ 为粘滞性系数, 又称粘性系数, 以 $\text{N/m}^2 \cdot \text{s}$ 计。在水力学中经常出现 μ/ρ 的比值, 因此为简洁起见有时用另一符号表示粘性系数

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-5)$$

式中 ν 也是粘滞性系数。其单位是 m^2/s , 或 cm^2/s 。为便于区分起见, 称 ν 为运动粘滞性系数, 称 μ 为动力粘滞性系数。

式(1-4)中的 $\frac{du}{dy}$ 是液体质点的角变形速度, 现说明如下:

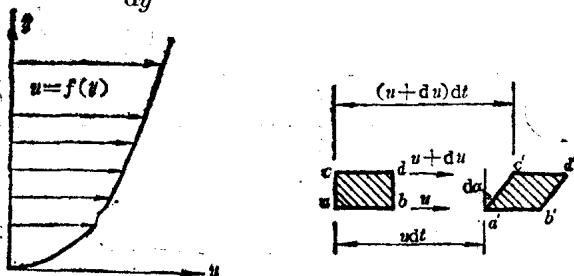


图 1-1

图 1-1 表示流速分布图。在液流中任取一个微小质点 $abcd$, ab 边上的流速为 u , cd 边上的速度为 $u+du$, 经过 dt 时间后, 质点运动到 $a'b'c'd'$ 的位置, $c'b'$ 超前 $du dt$ 的距离, 矩形 $abcd$ 变成一个平行四边形 $a'b'c'd'$, 其变形角度为 $d\alpha = \frac{du dt}{dy}$, 因此单位时间的剪切变形速度(即角变形速率)为:

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

粘滞性系数 μ 或 ν 的大小同液体的种类和温度有关。温度高, μ 或 ν 值减少。表 1-2 给出了不同温度时水的运动粘滞性系数 ν 的值。亦可用下列公式来计算水的运动粘滞性系数

表 1-2 不同温度下水的运动粘滞性系数

温 度 °C	ν		温 度 °C	ν	
	cm ² /s	m ² /s×10 ⁻⁶		cm ² /s	m ² /s×10 ⁻⁶
0	0.01775	1.775	18	0.01062	1.062
2	0.01674	1.674	20	0.01010	1.01
4	0.01563	1.563	22	0.00989	0.989
6	0.01473	1.473	24	0.00919	0.919
8	0.01387	1.387	26	0.00877	0.877
10	0.01310	1.310	28	0.00839	0.839
12	0.01239	1.239	30	0.00803	0.803
14	0.01176	1.176	40	0.00659	0.659
16	0.01118	1.118	50	0.00556	0.556

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-6)$$

式中: t 为温度, 以 °C 计。

水、汽油、酒精等液体在温度不变的条件下, 粘滞性系数 μ 值不变, 剪切应力同剪切变形率成正比, 这类液体称为牛顿液体。油漆、颜料等粘滞性系数与剪切变形速度有关。泥浆、血浆等在切应力超过某一界限后才开始发生剪切变形。凡是不适用牛顿内摩擦定律的液体统称为非牛顿液体, 本书不讨论非牛顿液体。

分析、研究液体运动时必须考虑到液体的粘滞性。但是在直接考虑到液体粘滞性的情况下, 有时会使分析变得相当复杂, 难以求解。为了简化起见, 水力学中有时需引用没有粘滞性的理想液体的模型, 即在粘滞性系数 $\mu=0$ 的条件下, 先分析、研究理想液体的流动, 从而得出结论。然后再考虑到粘滞性的影响, 对研究理想液体运动所得的结论进行修正, 最终得到实际液体运动的解。

(三) 压缩性及膨胀性

液体的压缩性系指液体受压后, 体积减小, 密度增大的性质。

压缩性的大小可用压缩性系数 β 表示。

$$\beta = \frac{\frac{-dV}{V}}{dp} \quad (1-7)$$

式中: dp 为压力(强)的增值, 以 N/m^2 计。

$\frac{-dV}{V}$ 是压力增加后, 体积的相对变化率。

所以 β 为增加一个单位压强时, 液体体积的相对变化值, 以 m^3/N 计。

水的压缩性很小, 当压力在 $1 \sim 100$ 个大气压的范围内, $\beta = 0.52 \times 10^{-6}$, 亦就是说, 每增加一个大气压, 水体积的相对压缩量只有 $\frac{1}{20000}$ 。因此, 在一般情况下, 工程中可以忽略水的压缩性。只有在一些特殊情况下, 如分析有压管道的水击时才考虑到水的压缩性。

水的膨胀性也是很小的, 水温每增加 1°C , 体积相对膨胀率小于 $\frac{1}{1000}$, 所以当温度变化不大时一般不考虑水的膨胀性。

(四) 表面张力

液体的每个分子都受到其他分子的吸引力, 在液体内部的分子为其他分子所包围, 四周的吸引力达到平衡状态。在液体自由表面由于分子间吸引力的不平衡, 能承受极为微小的张力, 这种张力称为表面张力。

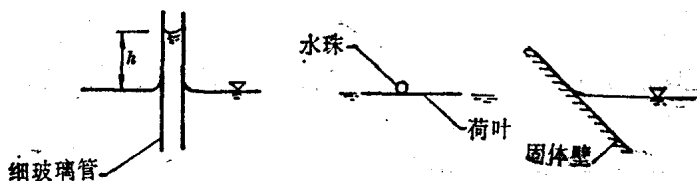


图 1-2

毛细管作用、荷叶上的水珠、液体表面对固体壁的附着作用等都是日常生活中所见到的与表面张力有关的现象,如图 1-2。

在一些情况下要考虑表面张力的影响,例如:多孔介质中和岩石裂隙中的渗流,尺寸很小的水工模型试验,用喷洒水幕冷却钢板等成微滴状的水流运动。使用玻璃管测压和测水位时,为消除毛细管作用的影响,内径不得小于 1cm。

在大多数大尺度水流运动的情况下是可以忽略表面张力影响的。

§ 1-4 作用在液体上的力

液体常常受到各种力的作用,如重力、离心力、科里奥利力、压力、表面张力、粘滞力等等。从水力学的角度出发,为便于研究液体平衡和运动的规律,将力分成质量力和表面力两大类。

质量力作用于液体的每一个质点上,其大小与受作用液体的质量成正比。由于质量同体积成正比,故质量力又称体积力。单位质量液体上所受的质量力称为单位质量力 F ,其单位为米/秒² (m/s²),与加速度的单位相同。

$$F = X\hat{i} + Y\hat{j} + Z\hat{k} \quad (1-8)$$

式中: X 、 Y 、 Z 分别为单位质量力在 x 、 y 、 z 轴方向的分力, $\hat{i}$ 、 $\hat{j}$ 、 $\hat{k}$ 分别为三个轴方向的单位矢量。

表面力作用于液体的表面上,其大小与作用面积的大小成正比。压力、剪切力(粘滞力)都是表面力。

液体同固体间的接触面是表面,一种液体同另一种液体间的接触面是表面,取脱离体时质点(微团)的表面也可以是表面,所以表面是具有相对性的。