

高等学校试用教材

水力学

同济大学周善生 主编

人民教育出版社

高等学校试用教材

水 力 学

同济大学周善生 主编

人民教育出版社

高等学校试用教材

水力学

同济大学周善生 主编

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14.75 字数 350,000

1980年7月第1版 1981年2月第1次印刷

印数 00,001—7,500

书号 15012·0263 定价 1.50 元

前 言

本书是根据一九七八年教育部委托召开的高等学校工科基础课水力学教材会议讨论的大纲编写的。主要适用于土建类给排水专业及路桥等专业。其他专业可根据教学需要对内容进行一定的取舍后参考使用。本书也可供有关工程技术人员参考。

本书编写中，注意加强基础理论，注意理论联系实际。书中附有一定数量的例题和习题(附有答案)，以巩固和加深对内容的理解；部分小字排印的内容可作为教学参考内容。

参加本书编写的有周善生(第一、二、三、四、五、六、八、十、十一章)、孙良佐(第七、九章)，由周善生主编。本书由哈尔滨建筑工程学院屠大燕、刘鹤年，湖南大学向华球、李纪臣主审；参加审稿的还有天津大学、太原工学院、北京建筑工程学院、西安冶金建筑学院、武汉建筑材料工业学院、重庆建筑工程学院、清华大学等院校的同志。在审稿过程中，各院校同志提出了很多宝贵的修改意见，特此一并致谢。限于编者水平，缺点和错误在所难免，请批评指出。

编 者

一九八〇年六月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 水力学的实践意义	1
§ 1-2 水力学的发展	2
§ 1-3 国际单位制(SI)和工程单位制	3
§ 1-4 液体的主要物理性质	6
§ 1-5 作用在液体上的力	14
习题	16
第二章 水静力学	17
§ 2-1 静水压强及其特性	17
§ 2-2 重力作用下水静力学基本方程	20
§ 2-3 静水压强的表示方法	22
§ 2-4 静水压强分布图	27
§ 2-5 水静力学基本方程应用举例	28
§ 2-6 静水压强的量测	31
§ 2-7 作用在平面壁上的静水总压力	36
§ 2-8 作用在曲面壁上的静水总压力	42
§ 2-9 浮力、潜体和浮体	45
§ 2-10 液体平衡微分方程及重力和惯性力同时 作用下的液体平衡	49
习题	55
第三章 水动力学基础	66
§ 3-1 描述液体运动的方法	67
§ 3-2 基本概念	68
§ 3-3 连续性方程	77
§ 3-4 连续性微分方程	81
§ 3-5 恒定流能量方程	82
§ 3-6 能量方程在水流量测方面的应用举例	100
§ 3-7 液体的运动微分方程	108

§ 3-8	一元非恒定流能量方程	110
§ 3-9	能量方程对掺气水流的应用	113
§ 3-10	恒定流动量方程	114
§ 3-11	无旋流和有旋流,流函数和流速势	123
§ 3-12	液体的曲线运动	129
	习题	136
第四章	液流阻力	146
§ 4-1	液体的粘滞性和粘度	146
§ 4-2	液流阻力和水头损失的两种形式	150
§ 4-3	液体流动的两种型态,层流和紊流	151
§ 4-4	均匀流阻力和水头损失关系	158
§ 4-5	计算沿程水头损失的通用公式	160
§ 4-6	层流运动	163
§ 4-7	紊流运动	167
§ 4-8	粗糙度和沿程阻力系数 λ 的确定	180
§ 4-9	计算沿程阻力系数公式的实际使用	186
§ 4-10	谢才系数 C 的确定	191
§ 4-11	计算管流 h_f 的指数公式	204
§ 4-12	边界层的分离	206
§ 4-13	管流局部水头损失	208
§ 4-14	明渠流局部水头损失	216
§ 4-15	绕流阻力	219
§ 4-16	圆球的沉降速度	222
	习题	224
第五章	孔口、管嘴和短管出流	229
§ 5-1	孔口出流	229
§ 5-2	管嘴出流	241
§ 5-3	短管出流	245
§ 5-4	有压涵洞	253
	习题	255
第六章	长管水力计算	262
§ 6-1	长管水力计算特点和计算公式	262

§ 6-2	简单管道系统	263
§ 6-3	给水管网水力计算基础	277
§ 6-4	有压管路中的水击	285
	习题	298
第七章	明渠均匀流	304
§ 7-1	明渠均匀流的形成条件和特点	304
§ 7-2	明渠均匀流计算公式	306
§ 7-3	河渠的粗糙系数	306
§ 7-4	水力最佳断面	307
§ 7-5	允许流速	311
§ 7-6	明渠均匀流的水力计算	313
§ 7-7	无压圆管均匀流水力计算	317
	习题	320
第八章	明渠非均匀流	323
§ 8-1	临界水深	324
§ 8-2	水跃	339
§ 8-3	渐变流与分段求和法作水面曲线	344
§ 8-4	水跃位置与上下游衔接	349
§ 8-5	渐变流水面曲线类型及水面曲线积分	353
§ 8-6	水工建筑物下游消能	358
§ 8-7	无压涵洞	360
§ 8-8	陡槽	362
	习题	364
第九章	堰流	369
§ 9-1	薄壁堰	370
§ 9-2	实用堰	378
§ 9-3	宽顶堰	381
§ 9-4	淹没堰	384
§ 9-5	堰的侧收缩	388
§ 9-6	小桥孔径计算	389
	习题	393
第十章	渗流	396

§ 10-1	概述	396
§ 10-2	渗流基本定律	397
§ 10-3	集水廊道	405
§ 10-4	单井	408
§ 10-5	大口井	413
§ 10-6	吸水井	418
§ 10-7	井群	420
§ 10-8	河边井	427
§ 10-9	一次地下灌注的有效半径和现场变水头法测定渗透系数	430
§ 10-10	水跃	432
§ 10-11	流网	434
	习题	438
第十一章 因次分析和模型试验		440
§ 11-1	因次分析	440
§ 11-2	模型试验概述	446
§ 11-3	力学相似	447
§ 11-4	欧拉数	450
§ 11-5	雷诺数——粘性力相似	452
§ 11-6	佛汝德数——重力相似	454
§ 11-7	重力和阻力同时作用的相似	456
§ 11-8	理查生数	459
§ 11-9	韦伯数、马赫数	462
	习题	462

第一章 绪 论

§ 1-1 水力学的实践意义

世界由物质组成，一切物质都在不停地运动。而物质的运动形式是多种多样的，例如机械运动、发声、发光、发热、电流以及化学变化、新陈代谢等等。各门科学就是以不同的物质运动形式为研究对象的。水力学是研究液体的机械运动(宏观运动)规律，以解决有关问题的科学。

许多和水有关的工程中，几乎都有构筑物存水、管渠输水的问题。构筑物受到水压力的作用，它的构造形式如果选择得好，水压力可能变小，甚至可以利用水压力增加构筑物的稳定性；选择不恰当的，就会得到相反的结果。水流现象是十分复杂多变的，根据水流情况选择管径大小和渠道断面，影响着工程投资和管理费用。液体既和边界相互作用，液体质点*之间也相互作用，水力学就是在液体和边界的对立统一及液体质点和质点相互作用的矛盾中力图找出一般性规律，以解决工程中所遇到的水力学问题的。

因为水力学是许多工程实践的基础，所以它有较广泛的实践意义，水力学在给水排水工程、水利工程、土木建筑工程、以及石油开采、机械制造等工程中都得到广泛的应用。因此，水力学必将在实现四个现代化的宏伟目标中起到重要的作用和得到进一步的发展。

* 质点是只体现宏观运动的分子团，是宏观运动的基本单位。

§ 1-2 水力学的发展

现代的水力学一般可分为水静力学和水动力学两大部分。前者研究液体在相对静止状态下的平衡规律；后者探讨液体处在运动状态下的流速以及流速和压力、能量等的关系。

十九世纪的水力学，大致沿着两个方向发展。一方面是理论的或经典的水动力学，用严格的数学分析对完全没有阻力的水流进行研究，因为水流现象的复杂程度，对于管、渠水流中阻力是主要的场合，不能得到符合实际的结果，实用意义不很大，另一方面是实验的水力学，用实验方法进行有实用意义的探索，但有忽视理论的偏向。

我们不能忽视经典水动力学的作用，因为从假定完全没有阻力的所谓理想液体概念导出的运动规律，在很多情况下能起指导作用，而且有些还能接近实际。

现代的水力学是在经典水动力学的理论上，对有阻力的所谓实际液体进行实验，通过实验对理论分析进行验证或加以纠正、补充，所得成果的统一体。因此，一般说来，水力学的结论是建立在简化了的水流现象基础之上的，在水力学的理论公式中，常常列入一些由实验得来的系数，实用上它的准确程度尚能使人满意。

水力学的研究对象虽然是液体，但主要是水。为了适应航空、气象、石油化工和暖气通风等工程的需要，将研究对象扩大到包括液体和气体（两者的机械运动规律有很多相似之处）的流体机械运动规律及其应用，而变成另一门学科，那就是流体力学。

在水力学或流体力学的研究中，因为考虑的是宏观的机械运动，把液体或流体都看成是连续介质（不考虑其分子、原子结构和分子间隙的连续分布的介质），这样用数学来处理就方便了。这种看法之所以能成立，是因为流体微观的分子间的空隙和流体机

械运动的宏观尺寸比较起来,是极为微小的缘故。

§ 1-3 国际单位制(SI)和工程单位制

所谓单位制是由选定的基本单位和它们的导出单位组成的一系列量度单位的总称。通常在水力学上的基本量有四个,即力(F)、质量(M)、长度(L)和时间(T)。但可以 $F=ML/T^2$ 或 $M=FT^2/L$ 把四个基本量化为三个。如果取 L 、 F 、 T 为基本量,而以相应的基本单位米(m)、公斤力(kgf)、秒(s)及其导出单位如能量单位“公斤力·米”(kgf·m)等组成的单位制,就是工程单位制,简称工程制。这种单位制是我国在水力学上已往常用的单位制。如果以 L 、 M 、 T 为基本量,而以相应的米(m)、公斤(kg)、秒(s)作为基本单位,这种单位制就属于国际单位制。它的国际代号为SI,我国简称国际制,它和工程制不同的地方是以公斤作为质量的单位,而不是力的单位。这样,它的导出单位如能量单位就成为“牛顿·米”(N·m),其中 1 牛顿=1 公斤·米/秒²(1N=1 kg·m/s²)。

在水力学上,工程制和国际制的重量换算基本关系是(因为 1 公斤力=9.8 公斤·米/秒²=9.8 牛顿):

$$1 \text{ kg} \cdot \text{f} = 9.8 \text{ N}$$

质量换算基本关系是

$$1 \text{ kg} \cdot \text{f} \cdot \text{s}^2 / \text{m} = 9.8 \text{ kg} \quad (\text{kg} \cdot \text{f} \cdot \text{s}^2 / \text{m} \text{ 称为工程质量单位})$$

由于国际制有许多优点,目前已有很多国家积极地推广国际制,连在英制根深蒂固的英国、美国也已采用或向国际制过渡。为便于国家之间的科学技术交流,本教材也采用国际制,同时根据实际需要,适当并用工程制。现将一些和水力学有关的国际制单位与工程制等单位的换算关系列表如表 1-1 所示。

表 1-1

物理量(因次*)	国际制单位和符号
质量(M)	千克、公斤(kg)
密度($L^{-3}M$)	公斤每立方米(kg/m ³)
动量(LMT^{-1})	公斤米每秒(kg·m/s)
力、重量(LMT^{-2})	牛顿·牛(N)
力矩(L^2MT^{-2})	牛顿米(N·m)
表面张力(MT^{-2})	牛顿每米(N/m)
压力、压强($L^{-1}MT^{-2}$) (另见表1-2)	帕斯卡(Pa) 1千帕(kPa) = 1000Pa 牛顿每平方米(N/m ²) 1Pa = 1N/m ²
功能(L^2MT^{-2})	焦耳(J) 牛顿米(N·m) 1J = 1N·m
功率(L^2MT^{-3})	瓦(W) 1千瓦(kW) = 1000W 1焦耳每秒(J/s) = 1W
动力粘度($L^{-1}MT^{-1}$)	帕斯卡秒(Pa·s) 1Pa·s = 1N·s/m ²
运动粘度(L^2T^{-1})	平方米每秒(m ² /s)

注：长度、面积、速度、加速度、(体积)流量等不涉及重量或质量的单位，国际制和

* 因次，通常指物理量的类别。本来，因次的定义是，把物理量用基本量表示时，时间 T 为基本量，则体积可用 L^3 表示，因此它对长度的因次为3；加速度可用 LT^{-2} 表示的因次式。目前，习惯上已把 L^3 、 LT^{-2} 这些因次式分别也称为体积、加速度的因

工程制等单位 and 符号	换 算 关 系
公斤力·秒 ² /米(kgf·s ² /m)	1kgf·s ² /m = 9.8kg 1kg = 0.102kgf·s ² /m
公斤力·秒 ² /米 ⁴ (kgf·s ² /m ⁴)	1kgf·s ² /m ⁴ = 9.8kg/m ³ 1kg/m ³ = 0.102kgf·s ² /m ⁴
公斤力·秒(kgf·s)	1kgf·s = 9.8kg·m/s
公斤力(kgf)	1kgf = 9.8N 1N = 0.102kgf
公斤力·米(kgf·m)	1kgf·m = 9.8N·m
公斤力/米(kgf/m)	1kgf/m = 9.8N/m
公斤力/米 ² (kgf/m ²) 公斤力/厘米 ² (kgf/cm ²)	1kgf/cm ² = 98kPa 1kgf/cm ² = 9.8N/cm ²
千瓦小时(kWh)	1kWh = 3600kJ 1kWh = 3600kN·m
公斤力·米/秒(kgf·m/s) 马力(HP)	1kgf·m/s = 9.8W 1kW = 102kgf·m/s 1HP = 75kgf·m/s
泊(P) 公斤力·秒/米 ² (kgf·s/m ²)	1P = 10 ⁻¹ Pa·s 1kgf·s/m ² = 9.80665Pa·s
斯托克斯、斯(St) 平方厘米每秒(cm ² /s) 1St = 1cm ² /s	1St = 10 ⁻⁴ m ² /s

工程制单位都相同,表中不列。

在该表示式中的各个指数称为该物理量对所取基本量的因次。若取长度 L 、质量 M 、示,它对长度的因次为 1,对时间的因次为 -2 ;而表示式 L^3 及 LT^{-2} 称为体积及加速因次。所以,本来能量的因次式是 L^2MT^{-2} ,习惯上也说能量的因次是 L^2MT^{-2} 。

在水力学上, 另有几种压力(压强)单位, 它们和国际制压力(压强)单位的换算关系, 列表如表 1-2 所示, 供查阅。

表 1-2

帕(Pa)	千帕(kPa)	工程大气压 (kgf/cm ²)	标准大气压	米水柱 (mH ₂ O)	毫米汞柱 (mmHg)
1	10 ⁻³	0.102×10 ⁻⁴	0.987×10 ⁻⁵	0.101×10 ⁻³	7.5×10 ⁻³
10 ³	1	0.102×10 ⁻¹	0.987×10 ⁻²	0.101	7.5
9.8×10 ^{4*}	98*	1	0.968	10	735.6
101325	101.325	1.033	1	10.33	760
9806.55	9.80655	10 ⁻¹	0.968×10 ⁻¹	1	7.356
133.332	0.133332	1.36×10 ⁻³	1.316×10 ⁻³	1.36×10 ⁻²	1

* 取近似值。

§ 1-4 液体的主要物理性质

事物发展的根本原因, 在于事物内部的矛盾性。因此, 我们在研究液体的机械运动之前, 对液体的物理性质先要有所了解。

首先, 讨论液体和固体的区别。液体分子间距离较大, 引力较小, 它的形状随容器形状而变。固体分子间距离较小, 引力较大, 以致固体的形状不易变化。而且, 一般情况下, 固体外形受外力作用而改变时, 质点相互间的切向应力有使固体恢复原形的倾向。但在液体, 形状变化的速度愈快, 切应力也愈大; 形变停止, 切应力也随之消失, 液体(包括气体)不再恢复原形。

流体包括液体和气体。液体和气体的区别是气体分子间的距离较液体的更远。因此气体很容易压缩, 当外界压力移去时, 将无限制地扩张, 它没有一定的形状。所以气体只能在完全密闭的情况下达到平衡状态。液体就相对地不可压缩, 如果将外界压力统统移去(只剩下它的蒸气压力), 液体会因分子内聚力的作用而聚

集在一起，不会扩散。所以液体放在容器中会有一个和气体分界的自由表面。

蒸气或汽是作为一种气体而包括在气体范畴之内，不过它的温度、压力和液体很相近，如水蒸气或水汽的状态和水很相近。气体可以说是一种高度过热的蒸气。空气是一种气体，因为它和液态空气的温度、压力等差别很大。

根据上述，液体和固体的主要区别是液体在任意切力的作用下，液体的相对静止状态将被破坏，并产生变形和流动。液体和气体的主要区别是液体能保持一定的体积。液体的很容易变形和变形后不再恢复原形的性质，就是流动性。这是我们能用不同尺寸的管、渠容易地输送液体，同时也是造成液体具有压力能够向各个方向传递这种特性的根本原因。

下面我们把液体的主要物理性质进行说明。

(一) 密度和重度

单位体积液体的质量称为该液体的密度，用符号 ρ 表示。如果体积为 V 的液体，它的质量为 m ，那末

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

密度的国际制单位是公斤/立方米 (kg/m^3)；工程制单位是公斤力·秒²/米⁴ ($\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)、吨力·秒²/米⁴ ($\text{tf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)等。

单位体积液体的重量称为液体的重度，用符号 γ 表示。令体积 V 的液体重量为 G ，那末

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

重度的单位是牛/米³ (N/m^3)；或公斤力/米³ (kgf/m^3)、公斤力/升 (kgf/l)等。

根据牛顿第二定律，可知 $m = G/g$ ，用 V 去除左右两边，得密

度和重度的关系式为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{或} \quad \gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中： g 为重力加速度， g 在地球上的标准值是 9.80665 m/s^2 ，实际上在地球表面各处 g 值有很小的变化，在水力学上为便于计算，可以采用 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

纯净的水在一个标准大气压作用下，它的密度，因温度而有变化，见表 1-3。

表 1-3

温 度 °C	密度 kg/m ³	温 度 °C	密度 kg/m ³
0	999.87	40	992.24
4	1000.00	50	988.07
8	999.88	60	983.24
10	999.73	70	977.81
15	999.13	80	971.83
20	998.23	100	958.38
30	995.67		

由表 1-3 可知，水在 4°C 时的密度最大。温度从 0°C 到 30°C ，密度减小只约 0.4%。在工程上，清水密度一般均按 1000 kg/m^3 计算。但在室内热水供给计算中，如果把水加热到 75°C ，和 4°C 的水相比，密度减小约 2.5%；如果加热到 100°C ，密度减小达 4%；密度减小就是体积膨胀。我们固然可以利用这密度的变化使水产生自然循环，即热水上升，冷水下降。然而也要注意热水体积的膨胀，要给增大的水体积有一个出路，否则管道或容器容易胀裂。

水的另一个重要性质是从液体变为固体（结冰）时，水的密度减小，冰在 0°C 时的密度为 $917 \text{ kg/m}^3 \approx 900 \text{ kg/m}^3$ 。如果以下标来区别水和冰的密度 ρ_* 和体积 V ，那末 $\rho_* \cdot V_* = \rho_* \cdot V_*$ ， $900 V_* = 1000 V_*$ 或 $V_* \approx 1.1 V_*$ ，即结冰时冰的体积要比水体积增大

10%，就容易使盛水容器或水管因膨胀而受力，甚至破裂。

现在将一些常见的液体及空气在一个工程大气压作用下20°C时的重度(国际制用千牛/立方米，工程制用公斤力/立方米表示)列如表 1-4。

表 1-4

流体名称	清水	海水	汞	四氯化碳	空气	汽油	酒精	原油	甘油	煤油
kN/m ³	9.8	10.0~10.1	133	15.6	0.0118	6.6	7.76	8.6	12.3	7.9
kgf/m ³	1000	1020~1030	13600	1600	1.205	670	790	880	1250	810

例 1-1 利用表 1-4 的数据，求清水和汞的密度，分别用国际制和工程制表示。

解：按式(1-3)分别计算如下：

$$(a) \rho_{\text{水}} = \frac{9.8 \text{ kN/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} (\text{SI})$$

$$\left(\because 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$\rho_{\text{水}} = \frac{1000 \text{ kgf/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 102 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} (\text{工程制})$$

$$(b) \rho_{\text{汞}} = \frac{133 \text{ kN/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 13.6 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= 13.6 \frac{\text{kg}}{\text{l}} (\text{SI})$$

$$\rho_{\text{汞}} = \frac{13600 \text{ kgf/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1390 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} (\text{工程制})$$

(二) 压缩性

在密闭容器内液体表面上，用活塞加压，液体就受到压力，受压后的液体体积要缩小，液体的压缩性就是液体在压力作用下体积缩小的性质，液体的特点是压缩性很小。根据试验，把温度为20°C、一个工程大气压作用下的水体积作为1，不同压力下的水体积如表 1-5。