

高等院校教材

水力学

李家星

赵振兴

主编

上册



河海大学出版社

水力学

(上册)

主 编 李家星 赵振兴

编著者(以姓氏笔画为序)

王培莉	王新宏	戎红玉	李家星
陈水倮	陈立德	吴如漪	张良然
赵振兴	钱善琪	谢佩珍	薛朝阳

河海大学出版社

内容简介

本书按原国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》编写,分为基础水力学(上册)和专门水力学(下册)两部分。

本书主要作为高等院校水利类、土建类各专业本科和专科教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/李家星,赵振兴主编.—2版.—南京:河海大学出版社,2001.1

ISBN 7-5630-1558-2

I. 水… II. ①李…②赵… III. 水力学—高等学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 78212 号

书 名 / 水力学(上册)

书 号 / ISBN 7-5630-1558-2/TV·193

责任编辑 / 吴毅文

责任校对 / 李一恬

封面设计 / 叶 兵

出 版 / 河海大学出版社

地 址 / 南京西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 / (025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)

印 刷 / 南京京新印刷厂

开 本 / 850 毫米 × 1168 毫米 1/32 12.5 印张 插页 2 335 千字

版 次 / 2001 年 1 月第 2 版 2001 年 1 月第 2 次印刷

印 数 / 6001 ~ 12000 册

定 价 / 32.00 元(共二册)

第二版前言

本书自1996年2月出版以来,经过几届教学的使用,发现了一些问题。再版主要根据教师和学生在使用本书中提出的问题,进行了修订。根据当前改革的需要,各专业对学时进行了进一步压缩。这次修订的原则是在保证基础理论部分的前提下,对全书的内容进行精选,删除一些偏于专业的内容,使重点更加突出,更有利于教学。

为使学生做习题时,有答案供参考,此次修订中,请了几位教师对全书的习题加上了参考答案。

在修订的过程中,对某些章节的内容请陈玉璞、薛朝阳两位教授进行了审阅,并请他们提出了宝贵意见。在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者给予指正。

编者

2001年1月

前 言

本书按国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》，结合我们多年的教学实践，并广泛地吸取国内外教材中的优点，编写而成。全书以分析水流现象、揭示水流规律、加强水力学的基本概念、基本原理为主，避免繁琐的数学推导，着重于物理概念的阐述。

全书分为上、下两册。上册为基础水力学部分；下册为专门水力学部分，可供不同专业选择。

本书主要由河海大学编写，部分章节由兄弟院校编写。参加编写的有：河海大学李家星（第一、四、十章）、赵振兴（第二、十一章）、陈立德（第三、十六章）、吴如漪（第五章）、戎红玉（第六章）、王培莉（第七、八、九章）、薛朝阳（第十四、十八章）；南昌大学张良然（第十二章）；福州大学陈水梯（第十三章）、谢佩珍（第十九章）；西安理工大学王新宏（第十五章）、钱善琪（第十七章）。

全书由李家星、陈立德统编审定，由胡德保主审。在编写过程中得到陈玉璞、许荫椿、薛朝阳教授等的热情帮助和大力支持，在此一并表示衷心地感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请批评、指正。

编 者

1995年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 水力学的定义、内容和发展概况	(1)
第二节 连续介质模型.....	(4)
第三节 液体的主要物理性质.....	(5)
第四节 作用于液体的力	(12)
习 题	(14)
第二章 水静力学	(17)
第一节 概述	(17)
第二节 静水压强及其特性	(17)
第三节 液体平衡微分方程及其积分	(20)
第四节 重力作用下静水压强的分布规律	(24)
第五节 重力和惯性力同时作用下的液体平衡问题 ..	(35)
第六节 作用于平面上的静水总压力	(38)
第七节 作用于曲面上的静水总压力	(46)
第八节 浮力与浮体的稳定	(53)
习 题	(60)
第三章 液体一元恒定总流基本原理	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 描述液体运动的两种方法	(75)
第三节 液体运动的一些基本概念	(78)
第四节 恒定流连续方程	(89)
第五节 恒定元流的能量方程	(90)
第六节 实际液体恒定总流能量方程	(95)
第七节 恒定总流动量方程.....	(104)

第八节	动量矩方程	(108)
第九节	空穴和空蚀的概念	(115)
习 题		(116)
第四章	层流和紊流,液流阻力和水头损失	(127)
第一节	概述	(127)
第二节	水头损失的分类	(127)
第三节	液体运动的两种流态——层流和紊流	(128)
第四节	切应力与沿程损失的关系——均匀流基本方程	(134)
第五节	层流运动	(137)
第六节	沿程损失的一般公式	(143)
第七节	紊流概述	(144)
第八节	紊流的流速分布	(152)
第九节	沿程水头损失系数 λ 的试验研究	(161)
第十节	谢才公式	(170)
第十一节	局部水头损失	(174)
第十二节	边界层概念、边界层分离,绕流阻力	(178)
习 题		(185)
第五章	液体三元流动基本原理	(188)
第一节	概述	(188)
第二节	流线及迹线方程	(188)
第三节	液体三元流动的连续性方程	(191)
第四节	液体质点运动的速度分解	(194)
第五节	有旋运动简介	(201)
第六节	液体恒定平面势流	(206)
第七节	粘性液体应力特征及应力-变形率关系	(225)
第八节	液体运动微分方程	(228)
第九节	液体运动微分方程的积分	(233)
习 题		(239)

第六章 孔口、管嘴出流和有压管道恒定流	(242)
第一节 概述	(242)
第二节 薄壁孔口的恒定出流	(243)
第三节 管嘴的恒定出流	(249)
第四节 孔口(或管嘴)变水头出流	(252)
第五节 短管的水力计算	(253)
第六节 长管的水力计算	(264)
习 题	(273)
第七章 明渠均匀流	(280)
第一节 概述	(280)
第二节 明渠均匀流的特性及水力计算	(285)
第三节 其他问题	(294)
习 题	(301)
第八章 明渠水流的两种流态及其转换	(305)
第一节 缓流和急流	(305)
第二节 临界底坡、缓坡和陡坡	(319)
第三节 两种流态的转换——水跃与水跌	(321)
习 题	(336)
第九章 明渠恒定非均匀流	(338)
第一节 概述	(338)
第二节 棱柱体明渠水面曲线微分方程	(339)
第三节 棱柱体明渠水面曲线形状分析	(341)
第四节 棱柱体明渠水面曲线计算	(354)
第五节 非棱柱体明渠水面曲线计算	(358)
第六节 天然河道水面曲线计算	(360)
第七节 明渠弯段水流简介	(377)
习 题	(383)

附 录

1. 梯形、矩形断面渠道正常水深 h_0 的图解

2. 梯形、矩形断面渠道底宽 b 的图解
3. 梯形断面渠道临界水深 h_c 的图解
4. 梯形、矩形断面渠道共轭水深 h_1 、 h_2 的图解

第一章 绪 论

第一节 水力学的定义、内容和发展概况

水力学是研究液体平衡和机械运动规律及其应用的一门学科,它是力学的一个分支。在水利类各专业中水力学是一门主要的技术基础课。

水力学课程的主要内容为液体平衡和运动的基本原理、水流阻力和水头损失、管道恒定流、明渠恒定流、堰闸出流等,而且视专业要求不同还有一些专门内容,如泄水建筑物下游水流的衔接和消能、管道非恒定流、明渠非恒定流、渗流、高速水流、挟沙水流、波浪运动等。

水力学不仅在水利建设中有着广泛的应用,例如防洪、灌溉、航运、水力发电、河道整治等各个方面,而且在国民经济的其他部门,例如造船、机械、冶炼、城市建设、石油、化工、生物、医学等各个领域,也需要相当的水力学知识。此外,水力学与其他学科相结合又形成了一些分支学科,如河流动力学、海岸动力学、环境水力学、随机水力学、计算水力学等。

水力学的发展和其他学科一样,依赖于生产实践和科学实验,并受科学发展和社会因素的制约。人类在除水患和兴水利的长期实践中积累了许多有关水流运动规律的知识。相传我国远古时期就有大禹治水。秦代在公元前 256 ~ 210 年兴建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程,尤其是四川岷江上的都江堰,具有灌溉、防洪、航运的综合效益。公元 1363 年制造的铜壶滴漏,是利用孔口出流使容器水位变化来计时的工具。此外,我国人民很早就有利用水流的冲力带动水碓、水磨和水排等水力机械来为生产服务。

凡此,都表明我国人民很早就对水流的运动规律有一定的认识。然而在长期的封建统治下,这种认识往往停留在感性阶段,还没有真正上升到理论的高度。

世界公认最早的水力学理论是公元前 250 年左右希腊人阿基米德(Archimedes)论述的液体浮力和浮体的定律。此后,欧洲各国长期处于封建统治时期,生产力发展非常缓慢,直到 15 世纪的文艺复兴时期,在意大利的供水工程和水运工程中才反映出水流运动规律的正确应用。

16 世纪以后,欧洲的封建制度逐渐崩溃,资本主义处于上升阶段,工农业生产有了很大的发展,对于液体平衡与运动规律的认识才随之有所提高。如 1650 年帕斯卡(B. Pascal)发现的液体压强传递规律;1686 年牛顿(I. Newton)所建立的牛顿内摩擦定律等。但总体来说,还没有形成液体运动的系统理论。

18~19 世纪,沿着两条途径建立了液体运动的系统理论。其一,1738 年伯努利(D. I. Bernoulli)在《水动力学》一书中给出了理想液体运动的能量方程,即伯努利方程;1755 年欧拉(L. Euler)首次导出理想液体运动微分方程组。后经许多学者,主要是一些数学家、力学家的努力,到 19 世纪中叶,大体建成理想液体运动的系统理论,习惯上称为“水动力学”(hydrodynamics)或古典流体力学。这种理论在数学分析上系统、严谨,但忽略了液体粘性,计算结果与实验不尽符合。其二,生产发展的需要,一些工程师和实际工作者,凭借实地观测和室内试验,得出经验公式,或在理论公式中引入经验系数以解决实际工程问题。如 1732 年皮托(H. Pitot)发明了量测流速的皮托管;1769 年谢才(A. de Chézy)建立了计算均匀流动的谢才公式;1856 年达西(H. Darcy)提出了线性渗流的达西定律等等。这些成果被总结成以实际液体为对象的重经验重实用的水力学(hydraulics)。古典流体力学和水力学都是关于液体运动的力学,但前者忽略粘性,重数学,重理论,后者考虑粘性,偏经验,偏实用。两种研究途径不同,虽有相互渗透,但基本上彼此平行发

展。

临近 19 世纪中叶, 1821 ~ 1845 年, 纳维 (C. L. M. H. Navier) 和斯托克斯 (G. G. Stokes) 等人成功地修正了理想流体运动方程, 添加粘性项使之成为适用于实际流体 (粘性流体) 运动的纳维 - 斯托克斯方程。19 世纪末叶, 雷诺 (O. Reynolds) 于 1883 年发表了关于层流、紊流两种流态的系列试验结果, 提出了动力相似律, 后又于 1895 年导出了紊流运动的雷诺方程。这两方面成果对促进前述两种研究途径的结合有着重要的作用, 可以说是建立近代粘性流动理论的两大先驱性工作。

生产的需要永远是科学发展的强大动力。19 世纪 20 世纪之交, 由于现代大工业的迅速发展, 特别是航空工业的崛起, 提出了许多复杂问题, 古典流体力学与水力学由于各自的局限性都不能很好地说明和解决, 这在客观上要求建立理论与实验紧密结合的, 以实际流体 (包括液体和气体) 运动为对象的理论。1904 年普朗特 (L. Prandtl) 提出了边界层概念, 创立了边界层理论, 它揭示了水、空气等低粘性流体的实际流动与理想流动之间的实质性联系, 既开辟了解决实际流体流动问题的途径, 又明确了理想流体理论适用的范围, 使流体力学与水力学两种研究途径得到了统一。后经许多学者的努力, 边界层理论和紊流理论都有很大的发展, 逐渐形成了理论分析和试验研究相结合的现代流体力学和现代水力学。当前, 现代的水力学和流体力学在研究方法上的区别已趋于消失, 只是研究内容上有所侧重。流体力学的研究对象是流体, 包括液体和气体; 水力学的研究对象是以水为代表的液体, 其运动规律也适用于低流速的气体。作为工科水利类技术基础课的水力学, 在内容上根据专业需要而有所取舍, 已如前述。在学习上既要强调基础理论, 也要强调工程应用。

近几十年来, 电子计算技术的发展和广泛应用, 使许多比较复杂的水力学问题可以用数值计算的方法来求解; 此外, 新的量测技术如激光、超声波、同位素以及各种新型的量测仪器也在不断地发

展,不断地扩大量测范围和提高量测精度,可以更深入地揭示水流运动的规律和机理,更准确地检验、校正理论分析和数值计算的结果。可以预见,理论分析、试验研究和数值计算相辅相成的研究方法将赋予水力学以新的生命力,使水力学在生产实际的各个领域更进一步地发挥其作用。

第二节 连续介质模型

水力学研究的是液体的宏观运动规律。液体的宏观特性和液体的微观结构、微观运动有着密切的联系。微观而言,液体由无数分子所组成,分子之间存在空隙,而且分子又在不断地运动。若以分子为研究对象,各物理量在空间上呈不连续性,在时间上也具有很大的随机性。要通过研究液体的微观运动来研究液体的宏观运动规律是不切实际的,也是难以办到的。然而液体分子间的空隙非常之小,例如相邻水分子的间距约为 $3.1 \times 10^{-8} \text{cm}$, 1cm^3 体积的水中约含有 3.34×10^{22} 个水分子,因此在研究液体的宏观运动规律时,没有必要研究液体的分子结构和分子运动,而是着眼于大量分子微观运动所显示出来的统计平均特性——宏观特性。为此,引入连续介质作为研究液体的模型,它是欧拉于 1753 年确立的,称为欧拉的连续介质模型(或称连续介质假说)。连续介质模型把液体看作由无数没有微观运动的质点组成的没有空隙的连续体,并且认为表征液体运动的各物理量,例如密度、速度、压强等在空间和时间上都是连续分布和连续变化的。引入连续介质模型,不仅可使研究工作大为简化,而且可以应用以连续函数为基础的数学分析这一强有力的工具。在连续介质中,质点是最小的物质单元,其概念是:每个质点包含足够多的分子并保持着宏观运动的一切特性,但其体积与研究的液体范围相比又非常之小,以致可以认为它是液体空间中的一个点。

连续介质是根据学科的研究目的而提出的,它与人们的感观一致,引入这个概念是十分自然的。大量的实践结果证实,连续介

质模型对绝大多数的液体是适用的,只有某些特殊问题除外,例如掺气水流、空穴现象等,液体的连续性遭到破坏,连续介质模型也就不再适用。

第三节 液体的主要物理性质

液体和其他物质一样,具有质量。质量是物质的基本属性,是惯性的度量。单位体积液体的质量称为液体的密度,以 ρ 表示。密度分布均匀的液体称为均质液体,否则为非均质液体。生产实际中遇到的液体大多数属于均质液体。设某均质液体的质量为 m , 体积为 V , 则液体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

对于非均质液体,根据连续介质模型,某点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1.2)$$

质量的单位是 g 或 kg,密度的单位是 g/cm^3 或 kg/m^3 。

液体的密度与液体的温度和所受的压强有关。在一个标准大气压下,不同温度水的密度见表 1.1。但在日常的温度和压强下,其变化范围不超过 0.5%, 可视为常数。水力计算中常用到的数值是:

水 $\rho = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 水银 $\rho_m = 13.6 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$

地球对地球表面附近物体的引力称为重力。重力的大小称为重量。重量 G 与质量 m 、重力加速度的关系是

$$G = mg \quad (1.3)$$

重量 G 的单位是 N, kN。 $1\text{N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$, $1 \text{ kN} = 1\,000\text{N}$ 。

单位体积液体的重量,即单位重量为 $\frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$ 。

液体除具有质量和重量外,它的主要特性是流动性、粘性、不易压缩性、具有表面张力以及在一定条件下可以发生汽化的性质。

表 1.1 水的各种物理性质(一个标准大气压下)

温度 T ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	动力粘 度 μ ($10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	运动粘度 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	体积弹 性系数 K ($10^9\text{N}/\text{m}^2$)
0	999.9	1.792	1.792	2.04
5	1000.0	1.519	1.519	2.06
10	999.7	1.308	1.308	2.11
15	999.1	1.100	1.141	2.14
20	998.2	1.005	1.007	2.20
25	997.1	0.894	0.897	2.22
30	995.7	0.801	0.804	2.23
35	994.1	0.723	0.727	2.24
40	992.2	0.656	0.661	2.27
45	990.2	0.599	0.605	2.29
50	988.1	0.549	0.556	2.30
55	985.7	0.506	0.513	2.31
60	983.2	0.469	0.477	2.28
65	980.6	0.436	0.444	2.26
70	977.8	0.406	0.415	2.25
75	974.9	0.380	0.390	2.23
80	971.8	0.357	0.367	2.21
85	968.6	0.336	0.347	2.17
90	965.3	0.317	0.328	2.16
92	961.9	0.299	0.311	2.11
100	958.4	0.284	0.296	2.07

一、粘性

液体(和气体)具有流动性。流动性是液体受切力发生连续不断变形的性质。这种变形亦称为剪切变形。

液体在流动(连续不断变形)的过程中,其内部会出现抵抗。不同性质的液体,如水或油,它们抵抗变形的能力是不同的。液体

在流动状态下抵抗剪切变形的性质称为液体的粘性(又称粘滞性)。

切力、粘性和变形之间的关系可以通过液体沿固体壁面作二元平行直线运动(见图 1.1)来分析。设液体质点是有条不紊的,一层一层互不混掺的向前运动(这种流动状态称为层流运动,将在第四章详细讨论),紧靠着固体壁面的液体质点由于附着力的作用粘附在壁面上,流速为零(称为实际液体的无滑动条件),而远离壁面处流速较大,其流速分布图如图 1.1(a)所示。若距固体边界为 y 处的流速为 u ,相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$,由于两相邻流层间存在相对运动(发生变形),则两流层之间产生一对与流动方向平行的切力,称为内摩擦力,又称为粘滞力。快层对慢层作用着与流动方向一致的切力,促使慢层加速;慢层对快层作用着与流动方向相反的切力,使快层减速。在液体内部的各流层之间,这一对对大小相等,方向相反,分别作用在液体内部相邻流层上的切力,起着抵抗液体相对运动的作用。其间,粘性起着传递运动使运动保持连续和阻滞运动的双重作用。由于粘性的存在,液体在作相对运动的过程中要克服内摩擦力做功,因此液体的粘性是产生能量损失的根源。

1686年由牛顿(I. Newton)首先提出,后经大量试验验证的定律,称为牛顿内摩擦定律。该定律表明液体的内摩擦力(即切力) T 与流层间接触面的面积 A 、流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比。引入比例系数 μ , 写为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

单位面积上的内摩擦力(切力)称为切应力 τ , $\tau = \frac{T}{A}$, 可写为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.5)$$

或

$$\tau = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad (1.6)$$

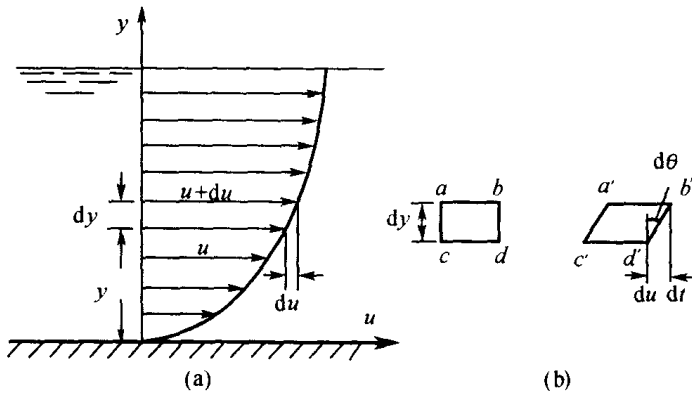


图 1.1

上式中
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.7)$$

式(1.4)和式(1.5)、(1.6)均为牛顿内摩擦定律的表达式。由式(1.4)或(1.5)可见, μ 的量纲是 $ML^{-1}T^{-1}$, 常用的单位是 $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$, 其中 Pa 是压强的单位, 称为帕斯卡, 简称帕, $1 Pa = 1 N/m^2$ 。由于 μ 含有动力学的量纲, 故称为动力粘度, 简称粘度。 ν 的量纲为 L^2T^{-1} , 常用单位是 m^2/s 。由于 ν 仅含运动学的量纲, 故称为运动粘度。

液体的粘度 μ (或 ν) 与液体的种类、温度及压强有关, 但压强对它的影响甚微, 可不考虑。因而, 对某种液体而言, ν 值主要随温度而变, 并随温度的升高而减小。不同温度时水的 μ 和 ν 值列于表 1.1。

可以证明, 流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 实质上是表示液体的切应变率 (又称为剪切应变率) 或角变形率。在图 1.1(a) 所示的 dy 流层中取一微小水体 $abcd$ [见图 1.1(b)], ab 面上各点的流速为 $u + du$, cd 面上各点的流速为 u , 水体上下两面存在流速差 du 。经过时段 dt 后, $abcd$ 由原来的矩形变成了平行四边形, 角变形为 $d\theta$ (又称为切应变)。因 dt 和 $d\theta$ 均为微小量, 可以认为