

939121

TV13
8700

高等学校教材
专科适用

水 力 学

浙江水利水电专科学校 郑文康 合编
东北水利水电专科学校 刘翰湘



TV13
8700

938121

高等学校教材

//////////////////// 专 科 适 用 //////////////////////

水 力 学

浙江水利水电专科学校 郑文康
东北水利水电专科学校 刘翰湘 合编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书为高等专科学校水工建筑专业和水利工程专业的教材。全书共分十三章,包括绪论、液体的物理力学性质、水静力学、液体运动的基本原理、水流阻力和水头损失、有压恒定流动、明渠恒定均匀流、明渠水流的流态及水跃、明渠恒定非均匀渐变流、非恒定流、堰流和闸孔出流、建筑物下泄水流的衔接与消能、渗流、水流相似原理及模型试验简介等内容。各章编有例题、习题和常用图表。

本书也可作为水文等专业的参考教材,并可供有关专业的工程技术人员参考。

高等学校教材

专科适用

水力学

浙江水利水电专科学校 郑文康 合编
东北水利水电专科学校 刘翰湘

水利电力出版社出版
(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 24印张 546千字
1991年10月第一版 1991年10月北京第一次印刷
印数 0001—4740册
ISBN 7-120-01446-3/TV·516
定价 6.20元

前 言

本书是根据1988年水利电力部高等学校水利水电类专业委员会专科教学组会议讨论确定的教学大纲和水利电力部制订的水利水电类专科教材编审出版规划而编写的。可作为高等工程专科的水工建筑和水利工程两专业的教材，也可作为专科其它有关专业的参考教材。

根据水工建筑和水利工程专业教学计划中规定的水力学课时，结合两专业的教学要点，在专科教学实践基础上，提出本教材的编写提纲，并广泛征求了有关学校和专业的意见。在内容的深度和广度方面，考虑了专科的教学要求，以尽可能地体现专科教育的特色。

本书包括上述两专业所必须的水力学基础知识、基本理论和方法。并联系今后的工作领域，适当拓宽了专业基础知识面。为便于教学，力争在文字上做到深入浅出，说理清楚。在各章中选编了一定数量的例题和习题，以帮助学生巩固所学知识，提高分析问题和解决问题的能力。

参加本书编写的有浙江水利水电专科学校郑文康（序言、第四、六、九章和第十二章第七至九节），东北水利水电专科学校刘翰湘（绪论、第一、二、三、十一章），浙江水利水电专科学校欧阳先蓉（第五、十、十三章），江西水利专科学校张杰（七、八章，十二章一至六节）。全书由郑文康、刘翰湘主编，郑文康统稿。

本书由河北水利专科学校汪国梁同志主审。天津大学习和忠同志对全书提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

在我国专科教育的发展比本科教育起步晚，并且几经波折。因此长期以来没有系统的适用于专科的教材，过去大多借用本科教材。这次水利电力部组织全国水利水电类的专科教材统编工作实属首次，是个良好的开端。但是，由于编者水平有限，编写时间仓促，工程专科的教学经验不足，书中缺点和错误在所难免。诚恳地希望广大读者，以及各方面同志提出批评和指正，以便改进。并通过今后的教学实践，不断提高，尽早地编写出更适合我国专科教育的水力学教材。

编 者

1990年7月

目 录

前 言

绪 论	(1)
-----------	-------

第一节 水力学的任务	(1)
------------------	-------

第二节 水力学的研究方法	(2)
--------------------	-------

第三节 水力学发展简史	(3)
-------------------	-------

第一章 液体的物理力学性质	(5)
---------------------	-------

第一节 液体的基本特性	(5)
-------------------	-------

第二节 连续介质的概念	(5)
-------------------	-------

第三节 液体的质量与密度、重量与容重	(6)
--------------------------	-------

第四节 液体的粘滞性	(7)
------------------	-------

第五节 液体的压缩性	(9)
------------------	-------

第六节 液体的表面张力	(10)
-------------------	--------

第七节 作用于液体上的力	(11)
--------------------	--------

第八节 物理量量纲及其单位的说明	(12)
------------------------	--------

第二章 水静力学	(15)
----------------	--------

第一节 静水压强及其特性	(15)
--------------------	--------

第二节 液体平衡微分方程式、等压面	(18)
-------------------------	--------

第三节 质量力为重力时的静水压强基本方程	(21)
----------------------------	--------

第四节 静水压强的量测	(27)
-------------------	--------

第五节 重力和其它质量力同时作用下的液体平衡	(31)
------------------------------	--------

第六节 作用于平面上的静水总压力	(35)
------------------------	--------

第七节 作用于曲线上的静水总压力	(41)
------------------------	--------

第三章 液体运动的基本原理	(50)
---------------------	--------

第一节 水流运动的基本概念	(50)
---------------------	--------

第二节 液体运动的分类	(57)
-------------------	--------

第三节 恒定流的连续性方程	(61)
---------------------	--------

第四节 恒定流沿流束的能量方程	(64)
-----------------------	--------

第五节 实际液体恒定总流的能量方程	(70)
-------------------------	--------

第六节 实际液体恒定总流的动量方程	(80)
-------------------------	--------

第七节 恒定平面势流简介	(84)
--------------------	--------

第四章 水流阻力和水头损失	(97)
---------------------	--------

第一节 概述	(97)
--------------	--------

第二节 沿程水头损失与切应力的关系	(98)
-------------------------	--------

第三节 液流内部的运动形态—层流与紊流	(100)
---------------------------	---------

第四节 紊流运动要素的脉动及其附加切应力	(104)
----------------------------	---------

第五节 层流流速分布及阻力系数	(108)
-----------------------	---------

第六节 紊流流速分布	(110)
------------------	---------

第七节 紊流阻力系数	(116)
------------------	---------

第八节 实际明渠和管道中沿程水头损失和阻力系数的实测及试验研究	(122)
---------------------------------------	---------

第九节	绕流阻力与局部水头损失	(127)
第五章	有压恒定流动	(138)
第一节	概述	(138)
第二节	简单短管的基本公式	(138)
第三节	简单短管水力计算	(143)
第四节	串联短管的水力计算	(148)
第五节	长管水力计算	(152)
第六章	明渠恒定均匀流	(166)
第一节	概述	(166)
第二节	明渠边壁的几何特性和水力特性	(167)
第三节	明渠水流特性及产生均匀流的条件	(172)
第四节	明渠均匀流的水力计算	(173)
第五节	明渠水力最佳断面	(180)
第六节	复式断面明渠均匀流水力计算	(183)
第七章	明渠水流的流态及水跃	(187)
第一节	明渠水流的流态	(187)
第二节	断面单位能量和临界水深	(189)
第三节	临界底坡、缓坡与陡坡	(193)
第四节	水跃及水跌现象	(196)
第五节	平底棱柱体明渠的水跃方程	(198)
第六节	水跃的能量损失	(201)
第八章	明渠恒定非均匀渐变流	(207)
第一节	明渠非均匀渐变流的微分方程	(207)
第二节	棱柱体明渠非均匀渐变流水面曲线的分析	(209)
第三节	明渠水面曲线的计算	(217)
第四节	天然河道水面曲线的计算	(223)
第九章	非恒定流	(235)
第一节	非恒定流的水流现象	(235)
第二节	非恒定流基本方程式	(241)
第三节	明渠非恒定渐变流微分方程组	(243)
第四节	有压管路非恒定流微分方程组	(247)
第五节	直接水击和间接水击的压强计算	(249)
第十章	堰流与闸孔出流	(254)
第一节	堰闸出流的流动特性	(254)
第二节	堰流的基本公式	(257)
第三节	薄壁堰流	(258)
第四节	实用堰流	(261)
第五节	宽顶堰流	(271)
第六节	闸孔出流	(278)
第十一章	水工建筑物下泄水流的衔接与消能	(288)
第一节	水工建筑物下泄水流的衔接与消能形式	(288)
第二节	下泄水流的衔接形式	(289)
第三节	底流式消能的水力计算	(295)
第四节	挑流式消能的水力计算	(305)
第五节	其它消能形式简介	(310)

第十二章	渗流	(314)
第一节	渗流的基本概念	(315)
第二节	渗流的基本定律——达西定律	(316)
第三节	恒定渗流的流速分布	(319)
第四节	地下河槽非均匀渐变渗流的浸润曲线	(321)
第五节	井的渗流	(326)
第六节	土坝的渗流	(330)
第七节	渗流场的基本理论	(336)
第八节	平面渗流的流网解法	(340)
第九节	水电比拟法绘制流网	(346)
第十三章	水力相似原理及模型试验简介	(352)
第一节	概述	(352)
第二节	相似现象的相似特征	(353)
第三节	相似现象的相似律	(356)
第四节	现象相似的条件	(359)
第五节	重力相似准则	(360)
第六节	阻力相似准则	(362)
第七节	其它单项作用力的相似准则	(370)
第八节	水力模型设计方法简介	(371)
附图 I	梯形及矩形渠道底宽求解图	(374)
附图 II	梯形及矩形渠道均匀流水深求解图	(375)
附图 III	梯形断面临界水深求解图	(376)
附图 IV	建筑物下游河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图	(377)

绪 论

第一节 水 力 学 的 任 务

水在人类生活与生产中占有极其重要的地位，它不仅是不可缺少的生活资料，也是不可替代的生产资源。

自然界中任何物质都具有二重性，水也不例外，它既能危害人类，又可被人们所利用。千百年来，人们与洪水作斗争中，在利用水为人类的生活和服务的实践中，对水流运动规律的认识也逐渐丰富起来，在不断总结经验的基础上形成了较为系统的水流运动理论——水力学。

在许多科学技术领域中，都不同程度地以物理学、理论力学中的一些普遍规律为依据。水力学的研究也是这样，从这些普遍规律出发，借助于数学这一有力工具，再结合水流运动的特点及其边界条件，从而建立了水力学的理论基础。

随着科学技术的发展，水力学也不断地得到完善，逐步形成了一门独立的学科。从学科划分角度看，水力学是力学的一个分支，它的主要任务是研究以水为代表的液体的平衡和运动规律，以及应用这些规律解决生产实际问题。

现代科学技术的迅速发展，以及各个学科的相互渗透，水力学的研究领域也不断地扩大。水力学的理论基础不仅在水利水电工程中得到广泛应用，而且在其他部门也不同程度的得到应用。如土木建筑、机械工程、城市给排水工程、交通运输、石油化工以及冶金采矿等。

水力学内容可概括为水静力学和水动力学两大部分：水静力学是研究液体在平衡或静止状态下的力学规律及其应用；水动力学是研究液体在运动状态下的力学规律及其应用。实际上，水静力学是特定条件下的水动力学问题。

为了兴利除害，开发利用水资源，必须在河道上修建水工建筑物（如闸、坝、槽、涵等）或由各种建筑物组成的多功能的水利枢纽，从而实现防洪、灌溉、发电、航运等多目标的开发与利用。无论是原河道或人工渠道，或者在其上修建建筑物以后，都存在各种状态的水流运动，及其与建筑物的相互作用问题。在给、排水的管道工程中，也存在着各种形式的水流运动及其与管道的相互作用。它们给水力学提出来的研究课题很多，综合起来主要有以下几个方面的问题。

一、水力荷载

水工建筑物建成后，都要承受巨大的静水压力或动水压力，以及透水基础中的渗透水压力等。水力学的任务是研究水在各种条件下的作用力，并探讨如何减少水流作用力和如何利用其作用力。这些作用力将作为水工建筑物结构设计的依据。

二、过水能力

一般在水利枢纽中常设有输水、泄水、水电站以及通航等建筑物，因此需要根据水力

学的基本原理，研究这些建筑物在各种条件下的过水能力及其影响因素，进而讨论如何提高过水能力。

三、水流流态

如前所述，修建枢纽建筑物后将会改变原河道的水流状态。当水流通过各种建筑物时将会形成各种水流运动状态，因此需要事先为枢纽设计和布置等提供有关的水力学要素。

四、水流能量损失

由于运动的水流存在着粘滞切力或紊动切力，水流流态的改变和水流能量的转换等，都将使水流产生能量损失。因此需要研究水流能量损失及能量变化的规律，以便利用其有效能量，减少其损失；或根据需要如何加大能量损失，消除多余能量，以防止水流冲刷河床、危及建筑物的安全。

应着重指出，在实践中所遇到的水力学问题不止上述内容，需要解决的问题还很多，如掺气与气蚀，脉动与振动，冲击波与冲击力以及江、河、湖、海水面的波浪运动等等。

总之，在水利水电工程建设中，无论在勘测、设计、规划、施工、或在管理等方面，都会遇到大量的水力学问题。因而，每一位水利工作者都需要认真学习和掌握本课程。

第二节 水力学的研究方法

水力学是一门专业技术基础学科。它是根据物理学、理论力学中的某些基本原理，结合实际的水流运动而建立起来的学科体系，并具有一定的独立性。水力学和其他学科一样，根据所研究内容的不同，问题的复杂性不同，需要采用不同的研究方法，概括起来有以下几种。

一、理论分析法

采用这种方法研究液体的平衡与运动规律时，首先要作一些假定，即根据水流的具体情况及其边界条件，抓住现象的本质，略去次要因素，借助于力学中的牛顿定律、动能定律、动量定理等，利用数学工具，找出能够表征水流现象本质的物理量之间的关系，建立起水力学的基本方程式；如压强基本公式、连续性方程式、能量方程式、动量方程式，以及描述水流运动的其他公式等。

应当指出，在应用纯理论分析法求解实际水流中的问题时，经常会遇到许多数学上的困难。只是在少数边界条件较为简单的情况下，才能求得理论解。对于在实际工程中出现的水力学问题，由于边界条件较为复杂，影响因素较多，要求得纯理论解是有一定困难的。因此，在研究水力学问题时，往往采用理论分析与实验相结合的方法。

二、科学试验法

借助于科学试验，对实际液体进行原型或模型观测，并将测得的一系列试验数据和观测到的一些现象加以分析和处理，探明本质，找出规律，从而得到某些水力学计算公式和方法。

实践是发展理论的基础。理论分析的解答是否正确，需要通过实验或实测加以验证，只有理论分析能够较好地反映客观实际时，所得到的结论才是正确的、可靠的。理论和实

践相结合,是研究水力学问题的重要方法和手段。

三、数值计算法

随着现代科学技术的迅速发展,特别是电子计算机技术的飞速发展,数值计算法现在也已成为一种研究水力学问题的基本方法。所谓数值计算法是对水力学中完整的数学问题(由基本方程、边界条件、初始条件组成),通过特定的计算方法(如有限差分法、有限元法、边界元法等)和计算技巧来求其数学近似解。在水力学问题中,如果水流运动的基本方程和边界条件都较为复杂,一般不易得到理论解析解。而数值计算法却能较满意地把这类问题的解答用数值的形式表示出来,从而达到求解的目的。

应当指出,对于一些诸如求解三元水流流速场等复杂问题,由于实验要受客观条件的限制,只有通过数值计算法来完成。数值计算法有时能弥补理论分析法和科学试验法的不足。

第三节 水力学发展简史

我国是世界上最古老的国家之一,有着悠久的历史和文化,号称文明古国。我国劳动人民在与洪水作斗争和治理江河方面,积累了丰富的经验,为防洪、治涝以及开发利用水资源作出了积极的贡献。

早在四千多年以前,相传大禹治水采取“疏壅导滞”的措施,疏九河之水以防洪患,对防洪排涝、发展农业生产作出了积极贡献,显示出大禹对水流运动规律的卓越见解及其治水才能,他是我国劳动人民与洪水作斗争的杰出代表。

在公元前250~210年间,中国社会正处于奴隶制向封建制过渡时期。到春秋战国末期,秦代为了巩固其统治,发展生产,修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程。特别是在四川省灌县(现为都江堰市)修建的都江堰水利工程,已有两千多年的历史,迄今仍发挥着巨大作用,因而成为闻名于世的灌溉系统工程。

我国历代劳动人民在与洪水作斗争的过程中,在开发利用水利资源的过程中,积累了宝贵经验,提出了许多治水的见解。公元前386年,魏文侯西门豹引漳河水灌溉农田;公元前256年,李冰主持修建都江堰工程,经后人总结,提出“深淘滩,低作堰”的原则;公元前216年,广西僮族人民开凿了沟通湘江和桂江的灵渠,使35km水路通航,到公元825年,又在该航道上设置了18道船闸。这类工程比欧洲早400年。在水利机械方面,我国在当时也处于世界领先地位。早在公元前16~17世纪就已发明了戽斗、桔槔、辘轳;到公元69年汉王景发明了水车;公元80年东汉杨琳发明了水力鼓风炉,促进了冶炼工业发展;公元230年间,东汉时期杜诗发明水排(相当于现在的水轮机);到唐宋时期,又出现了水力水车,向“自动化”迈进了一步。

在水利科学著作方面,如公元1360年,元代欧阳玄著有《至正河防记》一书,成为世界第一部水利工程书籍;1363年明朝潘季训在总结前人经验的基础上,提出了“以堤束水,以水攻沙”的见解;清代雍正年间,何梦瑶著有《算迪》一书,书中提出用过水断面面积乘上平均流速来计算流量的方法;古时计时工具——铜壶滴漏,则是利用孔口出流原理,

根据受水容器中的水位变化来计算时间。所有这些，都是水力学方面的宝贵历史遗产。

综上所述，14世纪以前，我国在水利科学技术上处于世界领先地位，但是由于我国长期受封建制度桎梏，社会发展迟缓，科学技术的发展受到抑制。对水流运动的认识也仅仅停留在感性认识阶段，始终没有形成系统的理论。

在公元前，欧洲各国同我国一样，当时也处于奴隶制社会，生产力得不到应有的发展。在15世纪以前，除古希腊哲学家阿基米德（Archimedes，公元前287~212）提出了浮体定律外，并没有其他方面的科学成果。

16世纪以后，欧洲一些国家处于资本主义兴起和发展时期，生产力有了一定程度的提高。在城市建设、航海以及机械工业发展的需求下，水力研究也相应地有了发展。16世纪意大利学者达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452~1519）发表了《论水的流动和水的测量》一文，他以实验的方法揭示水流现象，开始了水力学的新进展。17~18世纪，相继又有一些水力学方面的著作，如1612年意大利学者伽利略（Galileo，1564~1642）发表了《物体沉浮》的著作；1650年德国学者巴斯卡（Pascal，1623~1662）提出了静水压强传递理论——巴斯卡定律；1686年英国科学家牛顿（I. Newton，1642~1727）提出了液体内部摩擦力定律及物体运动的基本定律等；1738年瑞士数学家丹尼尔·伯努利（D. I. Bernoulli，1700~1782）发表了他的水力学巨著，首次系统地阐述了水动力学中的一些基本原理，如伯努利方程式，他被称为水力学创始人；1755年瑞士学者里昂纳得·欧拉（L. Euler，1708~1783）应用数学分析法，导出了液体平衡及运动微分方程式，阐明了理想流体运动的基本规律，从而奠定了水力学及流体力学的基础。

18世纪以后，纯理论研究或单独用实验方法研究水流运动规律已不能适应高速发展的生产需要，从而走向了理论分析与实验研究相结合的道路。二者的紧密配合进一步推动了水力学的发展。如1775年法国工程师谢才（Chézy，1718~1798）从实践中总结出明渠均匀流的阻力公式；1883年英国工程师雷诺（Reynolds，1842~1912）在系统实验的基础上，揭示了液体运动时的两种形态——层流和紊流，于次年他又提出了紊流运动的基本方程式——雷诺方程；1933年尼古拉兹（Nikuradse）通过对人工加糙管的系统实验得出了水流阻力与水头损失的规律。又如，意大利物理学家文德里（G. B. Venturi，1746~1822）、德国水力学家魏士巴赫（J. Weisbach，1806~1871）、法国工程师达西（H. -P. -G. Darcy，1803~1858）、爱尔兰工程师曼宁（R. Manning，1816~1897）、英国工程师佛汝德（W. Froude，1810~1879）、及德国工程师普朗特（Prandtl，1875~1953）等都进行了大量水力学的实验研究和理论分析，从而形成了理论和实践相结合的研究道路，促进了水力学的新发展。

中华人民共和国成立以来，在党的正确方针指导下，水利水电事业得到突飞猛进的发展。水利水电工程星罗棋布，遍及全国，为社会主义建设发挥了巨大的作用。在水力学研究方面也有了很大进展，尤其是从60年代以后，我国在消能防冲、高速水流及挟沙水流等方面的研究已进入了世界先进行列，多次参加世界性学术会议。无疑，随着我国水利水电建设事业的发展以及电子计算机在水利水电科学研究中的广泛应用，水力学这门学科一定会得到迅速发展。

第一章 液体的物理力学性质

在工程实践中，液体的形态是千变万化的，无论是静止状态还是运动状态，都将受到液体内在因素和外部条件的影响。液体无论是呈哪一种形态，都与液体自身的物理力学性质有密切关系，所以本章首先讨论液体的主要物理力学性质。

第一节 液体的基本特性

自然界由物质组成。一切物质都在不停地运动，而且运动形式又是多种多样的。由物理学知道，物质一般是以三种状态存在，即固态、液态和气态。这三种状态，既有共性，又有各自的特性。

固体、液体和气体都是由分子组成，它们都具有质量和重量。这是它们的共性。

固体分子之间有较强的内聚力，要改变固体的体积及其形状，需要施加很大的作用力。即固体在一定大小范围内的压力、拉力或剪切力作用下，能够保持固定的形状和一定的体积。固体不易变形和被压缩。

气体分子之间的距离很大，内聚力很小，其体积极易压缩和膨胀。它的体积易于变化，分子力图充满所能达到的任何空间，几乎没有抵抗拉力和剪切变形的能力。它既没有固定的形状，也没有固定的体积，具有易流动性。

液体不同于上述两种物体，它介于固体与气体的中间状态。液体分子之间的距离远比气体小得多，而内聚力比气体大得多，它没有固定的形状，但有固定的体积。一般讲，静止液体几乎不具备承受拉力和剪切变形的能力。因此，在微小切力作用下，极易变形和流动。但它可承受压力，在较大压力作用下，其体积略有微小的收缩。在一般情况下，可认为液体是不可压缩的。总之，液体的基本特性是易于流动，不易被压缩。

气体和液体都具有易流动性，故统称为流体。

第二节 连续介质的概念

如前所述，液体是由大量分子所组成。从分子结构出发，组成液体的分子都具有一定大小和质量，并且分子之间存在一定距离，其内部有空隙，不是一个连续体。分子进行着复杂的微观运动，即使是静止的液体也是如此。但水力学不研究液体中这种微观的运动，而是研究液体的宏观运动。因此，往往又将液体看作是由相互间无间隙的连续质点（质点内含有大量分子）所组成的连续体，它的物理性质和运动要素（如流速 v 、压强 p 、密度 ρ 等）也是连续分布的。在水力学中，将这种连续体称为连续介质。

根据连续介质的假定，可将运动液体质点的一切物理量（可认为是质点内所有分子运

动的平均效果) 视为时间和坐标的连续函数。充分利用连续函数这一有效的数学工具, 来研究液体的平衡和运动规律。

综上所述, 在水力学中所讨论的液体, 是一种易于流动、不易被压缩的连续介质。利用这一概念建立起来的水力学公式, 既适用于以水为代表的一般液体, 也适用于可忽略压缩性影响的气体。

第三节 液体的质量与密度、重量与容重

液体与自然界其他物体一样, 也具有惯性。惯性的大小可用质量来量度。质量愈大, 惯性也愈大, 愈难改变其原有的运动状态。根据达兰贝尔原理, 质量为 M 的液体具有的惯性力可用下式表示:

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

式中 F ——惯性力, N;

M ——液体的质量, kg;

a ——加速度, m/s^2 ; 式中负号表示惯性力的方向与加速度方向相反。

对于均匀液体, 单位体积内所具有的质量称为密度。用下式表示, 即:

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

式中 ρ ——密度, kg/m^3 ;

V ——液体的体积, m^3 ;

M ——体积 V 内具有的液体质量, kg。

由物理学知道, 地球对物体的引力称为重量(力)。液体也不例外, 也受地心引力作用。质量为 M 的液体所受重力的表达式为

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

式中 G ——液体的重量(力), N;

g ——重力加速度, 一般取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$;

M ——意义及单位同前。

对于均质液体, 单位体积内的液体所受的重量(力)称为容重, 即

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

将式(1-3)两端除以体积 V , 可得密度与容重的关系式, 于是

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

上两式中 γ ——液体的容重, N/m^3 。

水的密度和容重随温度、压强的变化而改变, 但改变不大, 通常视为常数。在国际单位制中, 在一个标准大气压下, 温度为 4°C 时的蒸馏水的密度及容重分别取值为: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3 = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。水在不同温度时的容重和密度见表1-1。

表 1-1

不同温度下水的物理性质数值表

温度 (°C)	容 重 γ (kN/m ³)	密 度 ρ (kg/m ³)	动力粘滞系数 μ (10 ⁻³ Pa·s)	运动粘滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	体积弹性系数 K (10 ⁹ Pa)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

例 1-1 在容器中装淡水 3 L，水温 4℃，求在一个大气压作用下水的重量和质量。

解：已知水的体积 = 3 L = 0.003 m³，密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，容重 $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ 。应用式 (1-2) 可得质量为

$$M = \rho V = 1000 \times 0.003 = 3 \text{ kg}$$

应用式 (1-4) 得水的重量为

$$G = \gamma V = 9800 \times 0.003 = 29.4 \text{ N}$$

第四节 液体的粘滞性

液体是具有粘滞性的。液体在运动过程中，因受粘滞性影响，使流层之间的速度不同，形成相对运动，这样就在两层之间的接触面上出现成对的内摩擦力，同时，该摩擦力又用以抵抗相对运动。这一性质称为液体的粘滞性。粘滞性是液体的基本特性之一，只有在相对运动时才显示出来，静止液体是不显示粘滞性的。

液体在运动过程中，由于克服内摩擦阻力以及液体与固体边壁间的阻力而做功，从而使液体产生能量消耗，这种能量消耗称为能量损失。由此可见，粘滞性是运动液体产生能量损失的根源。

实验表明，当液体沿某一固定平面作平行运动时（如图1-1所示），由于液层间存在流速梯度，液层上下出现一对方向相反的内摩擦力

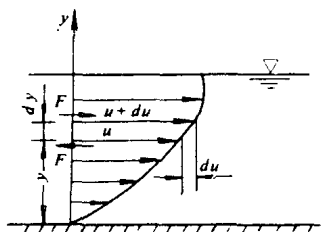


图 1-1

F ，其大小与液体的性质有关，并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 及接触面面积 A 成正比，而与接触面上的正压力无关。则内摩擦力的函数式可表达为

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

若用 τ 表示单位面积上的内摩擦力，其表达式为

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

以上两式称为液体的内摩擦定律，或称为牛顿内摩擦定律。

上两式中 F ——液体的内摩擦力，N；

A ——液体流层间的接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度， $1/s$ ；

τ ——液体流层间的切应力，Pa；

μ ——与液体的物理性质有关的比例系数，称为动力粘滞系数。

液体动力粘滞系数 μ 值的大小与液体性质有关，是衡量液体粘滞性的物理量，其单位可由式 (1-7) 的量纲和谐条件求得（参阅本章第八节）：

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[\frac{du}{dy}]} = \frac{[F \cdot L^2]}{[L/T \cdot L^{-1}]} = \frac{[F \cdot T]}{[L^2]}$$

因此， μ 的单位为帕·秒 ($Pa \cdot s$)。对于不同性质的液体，其动力粘滞系数 μ 值也不相同，而同一种液体， μ 值也随温度及压强所变化，但随压强变化不大，可忽略不计。在水力学中，液体的粘滞性也可用 μ 与 ρ 的比值表示，即

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

式中 ν ——液体运动粘滞系数，因 ν 具有运动学量纲而得名。同样，根据量纲和谐关系可得到其单位为 m^2/s 。

不同温度下的 μ 及 ν 值见表1-1。

水的运动粘滞系数也可用下述经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.001775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

式中 t ——水的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

在近似计算中, 可取 $\nu = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

必须指出, 上述牛顿内摩擦定律只适用于一般液体, 如水、酒精、水银以及某些油类, 这种液体统称为牛顿液体。对于牛顿液体, 由内摩擦定律 (式1-7) 看出, τ 与 $\frac{du}{dy}$ 值之间呈线性关系, 如图1-2中A线所示。对于某些特殊液体, 如泥浆、橡胶、油漆以及浓淀粉等, 其 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 值之间呈非线性关系, 如图1-2中B、C、D线所示。对于这类牛顿内摩擦定律已不适用的液体统称为非牛顿液体。本书只讨论牛顿液体。

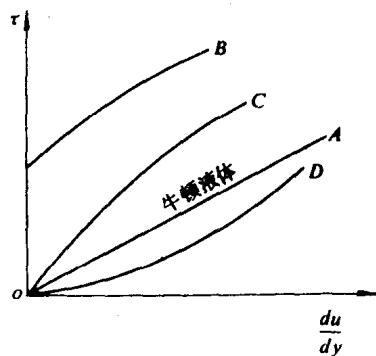


图 1-2

应指出, 粘滞性是实际液体的固有特性。由于粘滞性的存在, 给研究水流运动增加了困难。为使所讨论的问题得以简化, 便于理论分析, 在水力学中通常先假设液体没有粘滞性。这种没有粘滞性的液体称为理想液体, 而具有粘滞性的液体称为实际液体。

根据理想液体的概念研究液体的运动规律, 可以使所研究的问题得到简化, 最后将所得结论再考虑粘滞性影响而加以修正, 然后应用到实际液体中去。

例 1-2 将一面积为 1 m^2 的平板放入盛水的槽中, 若平板在水面上以 $u = 1 \text{ m/s}$ 的速度沿水平方向运动, 平板和槽底之间的距离 $\delta = 1 \text{ mm}$, 假设水层内流速按直线分布, 如图1-3所示。当水的温度为 10°C 时, 求平板所受阻力。

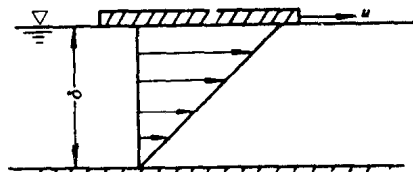


图 1-3

解 因水层的运动速度按直线分布, 则流速

梯度 $\frac{du}{dy} = \text{常数}$ 。由表1-1查得, 当 $t = 10^{\circ}\text{C}$ 时, $\mu = 1.307 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 应用式 (1-6) 可得

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = 1.307 \times 10^{-3} \times 1.0 \times \frac{1.0}{0.001} = 1.307 \text{ N}$$

第五节 液体的压缩性

液体不能承受拉力, 但可承受压力。液体在压力作用下体积要缩小。液体的这一特性称为液体的压缩性 (或称为弹性)。压缩性的大小可用体积压缩系数 β 表示。 β 值代表压强增加一个单位值时, 液体体积的相对缩小值。

设液体所受到的压强为 p 时, 其体积为 V , 若压强增加 dp 后, 体积缩小量为 dV , 则体

积压缩系数为

$$\beta = - \frac{dV/V}{dp} \quad (1-10)$$

式中负号表示压强增大，体积缩小，故 dV 与 dp 符号相反，为使 β 是正值，式前加一负号。 β 值愈大，压缩性也愈大。 β 的单位为 $1/\text{Pa}$ 。

体积压缩系数的倒数称体积弹性系数，用 K 表示，即

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

K 的单位为 Pa 。 K 值愈大，表明液体体积愈不易压缩。当 $K \rightarrow \infty$ 时，说明体积压缩性接近于零，可视为不可压缩，也就是不存在弹性变形。

总之， β 和 K 均表示液体的压缩性。不同种类的液体具有不同的 β 和 K 值。对于同一类液体，它们的数值也随温度和压强而变化，但是变化不大，一般可看作常数。在水力学中，一般取水的弹性系数 $K = 2.1 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，可见水是不易压缩的。只有当压强变化很大而又非常迅速时，才考虑压缩性。如输水管路中的水击现象，就必须考虑水的压缩性，否则将会导致错误的结果。

水在不同温度时的弹性系数值可从表1-1中查用。

例 1-3 设有 1m^3 的水，在常温下其压强由 98kPa 增加到 9800kPa 。试求水体的压缩量为多少？压缩后的剩余体积是多少？

解：由表1-1查得水的弹性系数 $K = 2.1 \times 10^6 \text{ kPa}$ 。由式(1-11)可得

$$dV = - \frac{V dp}{K} = - \frac{1 \times (9800 - 98)}{2.1 \times 10^6} = - 0.0046\text{m}^3$$

式中负号表示体积的缩小，而 0.0046m^3 表示体积的压缩量。

设原体积为 V_1 ，剩余体积为 V_2 ，所以

$$V_2 = V_1 - dV = 1 - 0.0046 = 0.9954\text{m}^3$$

由上述计算可知，当压强增加 $(9800 - 98) = 9702\text{kPa}$ （相当于99个大气压）的情况下，水的体积仅减少0.46%。可见，在一般情况下，把水看作是不可压缩的液体，在工程实践中是允许的。

第六节 液体的表面张力

在液体分子之间的引力作用下，液体与其它介质（如气体或固体）分界面附近的液体表面产生微小张力，称为表面张力。表面张力的方向沿着液体表面的切线方向，由于表面张力的作用，将会影响液体表面的形状。表面张力的大小用表面张力系数 σ 表示，其单位为 N/m 。

液体的表面张力现象可以从试验得到证实。在静止的液体中插入一根玻璃管，因表面张力作用，管内外液面具有不同高度，如图1-4所示。由图可见，表面张力不仅产生在液