

21世纪

水利水电类高职高专教育统编教材

水力学

主 编 陈海迟 郝和平

副主编 张茂林 丁占强



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水利水电类高职高专教育统编教材

水 力 学

主 编 陈海迟 郝和平

副主编 张茂林 丁占强



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/陈海迟, 郝和平主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

21 世纪水利水电类高职高专教育统编教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6102 - 1

I. 水… II. ①陈…②郝… III. 水利学—高等学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 189411 号

书 名	21 世纪水利水电类高职高专教育统编教材 水力学
作 者	主编 陈海迟 郝和平 副主编 张茂林 丁占强
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 12.25 印张 290 千字
版 次	2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

内 容 提 要

本书是为高等职业技术学院和普通高等专科学校的水利水电工程专业、水利工程专业编写的全国水利水电类高职高专统编教材。全书共分九章,内容包括绪论、水静力学、液体运动的基本理论、液流形态与水头损失、有压管流、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、堰流与闸孔出流、水工建筑物下游水流的衔接与消能。各章附有例题、习题和常用图表。

本书也适用于水文水资源工程、给水排水工程、水利工程监理、水土保持、水电站动力设备、治河与防洪等专业,并可用于成人专科学校以及普通本科院校的高等职业技术学院同类专业教学,还可供水利水电工程技术人员参考。

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职高专人才培养工作意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神，按照高职高专水利水电工程及水利工程专业的水力学课程教学大纲编写的。本书在编写过程中，理论上以适当够用为度，结合专业，突出实用；在内容上力求概念准确清晰，文字叙述上删繁就简，结构紧凑，语言顺畅，通俗易懂。本书的例题、习题和图表结合专业，前后照应，避免重复。本书的篇幅少，内容精练，以应用为主，体现高职高专教育的特色。

全书由内蒙古机电职业技术学院的老师陈海迟编写了第一、二、八章，郝和平编写了第六、七章，张茂林编写了第三、九章；内蒙古准格尔旗水土保持局丁占强编写了第四、五章。全书由陈海迟统稿。一些水力学专家对本书提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请专家和广大师生对本书予以批评指正。

编 者

2008 年 9 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水力学的定义及任务	1
第二节 水力学的研究方法	2
第三节 水力学发展简史	3
第四节 液体的物理力学性质	4
第五节 作用于液体上的力	10
习题	10
第二章 水静力学	12
第一节 静水压强及其特性	12
第二节 压强的表示法	14
第三节 静水压强的基本方程	16
第四节 静水压强的量测	19
第五节 作用在平面壁上的静水总压力的计算	21
第六节 作用在曲面壁上的静水总压力的计算	27
习题	30
第三章 液体运动的基本理论	34
第一节 描述液体运动的两种方法	34
第二节 液体运动的一些基本概念	35
第三节 恒定总流连续性方程	40
第四节 恒定总流的能量方程	42
第五节 能量方程应用举例	49
第六节 恒定总流的动量方程及其应用	51
习题	56
第四章 液流形态与水头损失	60
第一节 水头损失产生的原因及其分类	60
第二节 均匀流中的沿程水头损失	62
第三节 液流运动的两种形态	62
第四节 圆管层流中的沿程水头损失	65

第五节	紊流中的沿程水头损失	66
第六节	沿程水头损失的分析和计算	70
第七节	局部水头损失的分析与计算	76
习题		80
第五章	有压管流	83
第一节	有压管道及分类	83
第二节	简单短管的水力计算	84
第三节	简单长管的水力计算	86
第四节	简单管道的水力计算的基本类型	88
第五节	简单短管水力计算应用举例	93
习题		98
第六章	明渠恒定均匀流	102
第一节	概述	102
第二节	明渠均匀流的特性及其产生条件	104
第三节	明渠均匀流的计算公式及有关问题	105
第四节	渠道水力计算的类型	111
习题		115
第七章	明渠恒定非均匀流	116
第一节	概述	116
第二节	明渠水流的流态	116
第三节	跌水与水跃	126
第四节	明渠恒定非均匀渐变流基本方程	131
第五节	棱柱体渠道恒定非均匀渐变流水面曲线定性分析	132
第六节	棱柱体渠道中非均匀渐变流水面曲线的计算	137
第七节	弯道水流简介	143
习题		144
第八章	堰流与闸孔出流	147
第一节	概述	147
第二节	堰流	148
第三节	闸孔出流	160
习题		165
第九章	水工建筑物下游水流的衔接与消能	167
第一节	水工建筑物下游水流的衔接与消能形式	167
第二节	底流式衔接与消能的水力计算	168
第三节	挑流消能的水力计算	178
习题		181

附图 I	梯形及矩形渠道底宽求解图·····	183
附图 II	梯形及矩形断面明渠正常水深求解图·····	184
附图 III	梯形、矩形、圆形断面明渠临界水深求解图·····	185
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·····	186

第一章 绪 论

第一节 水力学的定义及任务

水力学的定义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。

水在人类生活与生产中占有极其重要的地位，它既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。多少年来，在人们与洪水作斗争中，利用水为人类的生活与生产服务中，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。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，水力学也不断得到了完善，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了广泛应用，而且在其他部门如土木建筑、机械工程、城市给水排水工程、交通运输、石油化工以及冶金采矿等，也得到了不同程度地应用。

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。它们给水力学提出的研究课题很多，综合起来主要有以下几个方面。一是水力荷载：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来作为水工建筑物结构设计的依据。二是过流能力：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。三是水流流态：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。由于运动的水流存在着粘滞切应力或紊动切应力，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、危及建筑物的安全等。

以上简单介绍了枢纽工程中的一些水力学问题。此外，还有河渠水面曲线计算问题、建筑物下游水流衔接与消能的问题、建筑物渗流的问题，还有一些特殊的水力学问题，如管、渠非恒定流问题，高速水流中的掺气、气蚀、脉动、振动和冲击波等问题，有害物质对水资源的污染问题等。

总之，在水利水电工程建设中，无论在勘测、设计、规划、施工和管理等方面，都会遇到大量的水力学问题。因而，要求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、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科学体系，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，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，首先要做一些假定，即根据水流的具体情况及其边界条件，抓住现象的本质，忽略次要因素，借助力学中的牛顿定律、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。只有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，单靠理论分析方法是有一定困难的。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。

理论和实践相结合，是研究水力学问题的重要方法和手段。现阶段研究水力学问题的科学试验主要有两种：

(1) 原型观测。在野外或工程现场，用仪器设备直接观测水工建筑物或河渠中的水流运动要素和水流现象，为检验理论分析成果或总结某些基本规律提供依据。

(2) 模型试验。水利工程中的水流现象是复杂多变的，加之理论分析的局限性，许多实际工程提出的问题，单靠理论分析是不够的，这就需要根据相关的相似原理，按照一定的比例尺，把实际工程缩小，作为模型，在模型上预演原型上相应的水流运动，总结出其运动规律，然后按相似关系换算为原型的数值，为工程设计提供依据。模型试验有比例模型试验、系统试验、模拟试验三种类型。

三、数值算法

随着现代科学技术的迅速发展,特别是计算机技术的飞速发展,数值算法现已成为一种研究水力学问题的基本方法。所谓数值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。

四、量纲分析法

在试验中为了从观测的试验数据,总结出水流的运动规律,除了用理论分析、处理试验数据外,还需要应用量纲分析。

在水力学研究中,需要用物理量表述水流现象及其规律,如长度、时间、力、流速、粘滞系数等,表示这些物理量的性质和类别就是量纲。长度的量纲用 $[L]$ 、质量的量纲用 $[M]$ 、时间的量纲用 $[T]$ 、力的量纲用 $[F]$ 等。

量纲与单位不同,量纲是物理量的质的表征,单位是物理量的量的表征,是度量物理量数值大小的标准,如时间为 1h,可用 60min、3600s 等不同的单位表示,但无论用何种单位计量时间,它们都具有同一的时间量纲。

我国实行的法定计量单位,主要是国际单位制,长度的单位为 m,时间的单位为 s,质量的单位为 kg,除此以外,我国工程界常使用工程单位制,工程单位制中长度的单位为 m,时间的单位为 s,力的单位为 kgf。两种单位制力和质量的换算关系为

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 = 9.8\text{N}, \quad 1\text{kgf} = 1/9.8\text{kgfs}^2/\text{m} = 0.102\text{kgfs}^2/\text{m}$$

如果物理量的量纲为 $[1]$,则称为无量纲数。如水面坡度 J 可用水面落差 Δh 和流程 L 的比值表示, $J = \Delta h/L$,量纲式为 $[L]/[L] = [1]$,即为无量纲数。

任何一个能正确反映客观规律的物理方程,其中各项的量纲都必须是一致的,这就是量纲和谐原理,它是量纲分析的基本原理。利用量纲和谐原理既可以用来检查所建立的方程式或经验公式的正确性和完整性,而且还可以在试验研究的基础上,通过量纲分析建立物理方程。

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 4000 多年以前,大禹治水,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理才能,他是我国劳动人民与洪水作斗争的杰出代表。

秦代在公元前 256~前 210 年间修建的都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,都说明当时对明渠水流和堰流的认识已达到相当高的水平。尤其是都江堰工程在规划、设计和施工等方面都具有很高的科学水平和创造性,至今仍发挥效益。我国历代劳动人民在开发利用水资源的过程中,积累了宝贵经验,提出了许多治水的见解。14 世纪以前,我国在水利科学技术上是处于世界领先地位的,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科学理论。

世界公认最早的水力学原理是公元前 250 年左右希腊人阿基米德 (Archmedes) 提出的浮体定律。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 世纪文艺复兴时期,尚未形成系统的理论。

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,水力学研究也相应的有了发展。例如意大利学者达·芬奇 (Leonardo da Vinci) 以实验的方法揭示水流流态及水流现象,开始了水力学的新进展。到 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) 发表了物体沉浮的著作,1650 年德国学者帕斯卡尔 (Pascal) 提出了静水压强传递理论——帕斯卡定律;1686 年英国科学家牛顿 (I. Newton) 提出了液体内部摩擦力定律及物体运动的基本定律等;1738 年瑞士数学家伯努利 (D. I Bernoulli) 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 年瑞士学者里欧拉 (L. Euler) 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。如 1775 年法国工程师谢才 (Chezy) 从实践中总结出明渠均匀流的公式;1883 年英国工程师雷诺 (Reynolds) 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,后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。还有意大利物理学家文丘里 (G. B. Venturi)、德国水力学家魏士巴赫 (J. Weisbach)、法国工程师达西 (H. P. G. Darcy)、爱尔兰工程师曼宁 (R. Manning)、英国工程师佛汝德 (W. Froude) 及德国工程师普朗特 (Prandtl) 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。

迅速发展的现代实验技术如激光、超声波、同位素等和建立在相似理论及量纲分析基础上的实验理论,大大提高了探索水流运动规律和对实验资料进行理论分析的水平。尤其是近半个世纪以来,计算机的广泛应用使许多比较复杂的水力学问题通过理论分析、试验研究和数值计算三者得到解决。目前我国在消能防冲、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,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。可以预见,理论分析、试验研究和数值计算三者相辅相成的研究方法将赋予水力学以新的生机,使水力学在各个工程技术领域中发挥更大的作用。

第四节 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，所以首先讨论液体的主要物理力学性质。

一、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。物质以三种状态存在，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的，它们的共性是都具有质量和重量。

液体与固体的主要区别是液体容易流动，因为液体分子之间的距离相对较大，分子之间容易移动，只要有很小的外力，液体就可以改变形状而发生流动。液体与气体都具有易流动性，所以统称流体。它们的区别是液体能够保持一定的体积，在外力的作用下其体积变化很小，当容器大于液体体积时，液体不会充满整个容器，并且有自由表面。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，可以任意扩大体积，直到充满容器的整个空间，故没有自由表面。

液体与其他物体一样，从微观角度看，它是由有间隙的分子构成，是不连续、不均匀的。但从宏观的角度来研究液体的运动，常把液体视为内部无任何间隙、由无数个水质点充满液体内部整个空间的均匀的连续介质。

综上所述，气体和液体都具有易流动性。液体是一种易流动、不易被压缩、均匀等向的连续性介质。

二、连续介质假设与理想液体的概念

1. 连续介质假设

液体和其他物质一样，基本结构都是由分子所组成。由于分子间距的存在，分子与分子之间就具有一定的空隙。此外，组成液体的分子还在不停地进行着复杂的热运动，由于分子在空间分布上的不连续性和分子热运动在时间上的随机性，致使液体的各项物理量在空间和时间上均呈现不连续变化，给研究液体的运动带来了困难。但水力学主要是为水利工程服务的，不研究液体中微观的运动，而注重液体的宏观运动。因此，往往又将液体看作是由相互间无间隙的连续质点所组成的连续体，它的物理性质和运动要素如流速、压强等是连续分布的。因此，在水力学的研究中，将液体假设成为一种由无数没有微观运动的质点所组成且毫无空隙地充满空间的连续体。这种抽象化了的液体模型，就是1753年由欧拉提出来的连续介质假设。

在连续介质假设的基础上，一般还认为液体是均质的，液体质点的物理性质在液体内部各部分和各方向上是相同的，即具有均匀等向性。

有了连续介质假设，则液体中的一切物理量（如速度、压强等）均可视为空间坐标和时间的连续函数，这为运用高等数学中的连续函数理论来研究液体的运动规律提供了很大的方便。长期的生产实践和科学试验证明，在连续介质假设条件下所得到的结论与客观实际十分相符，完全能够满足工程实际的需要。

根据连续介质的假定，可将运动液体质点的一切物理量视为时间和空间坐标的连续函数。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。

2. 理想液体的概念

实际液体除具有一些物理性质外，还具有粘滞性、压缩性和表面张力特性等特性，这些特性都不同程度地影响液体的运动。其中，粘滞性是液体最突出、最重要的物理特性，

它对液体运动的影响极为复杂,也给研究液体的运动带来了很大的困难。为了便于分析和研究,引入了理想液体。理想液体就是指绝对不可压缩、不能膨胀、没有粘滞性、也没有表面张力特性的液体。显然,理想液体并不是实际液体,只是为了研究方便而引出的一种理想化了的液流模型。由于实际液体的压缩性、膨胀性和表面张力均很小,与理想液体差别不大,但粘滞性是否存在则是理想液体和实际液体最重要的差别。一般按理想液体所得出的结论在应用到实际液体时,均应考虑由粘滞性的影响而带来的偏差并加以修正。

三、液体的质量与密度、重量与容重

1. 液体的质量与密度

液体与其他物体一样,也具有惯性。惯性的大小可用质量来度量。质量越大,惯性也越大,越难改变其原有的运动状态。设质量为 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的方向相反。

若质量是均匀的,可以用密度表示,单位体积内液体所具有的质量称为密度,用 ρ 表示,若体积为 V ,质量为 m ,则密度为

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

密度的单位为 kg/m^3 ,一般液体的密度随温度和压强的变化而变化。但变化很小,所以水利工程中,常把在一个标准大气压下、温度为 4°C 时水的密度 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ 作为日常计算值。

2. 液体的重量与容重

对于均质液体又可以用容重表示,单位体积内所具有的重量称为容重,用 γ 表示,若重量为 G ,体积为 V ,其容重为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

容重的单位是 N/m^3 或 kN/m^3 ,不同的液体具有不同的容重,同一种液体,其容重随温度和压强而变,但变化很小,水利工程中一般按常数计算。采用一个标准大气压下,温度为 4°C 时水的容重 $\gamma = 9800 \text{N/m}^3$ 或 $\gamma = 9.8 \text{kN/m}^3$ 作为日常计算值。如果液体为水银,则水银的容重 $\gamma = 133.28 \text{kN/m}^3$ 。

由式 (1-2) 和式 (1-3) 可得密度与容重的关系式为

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

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。几种常见液体的容重见表 1-1。

表 1-1 几种常见液体的容重

液体的种类	汽油	酒精	海水	水银
容重 (kN/m^3)	6.664~7.350	7.778	9.996~10.084	133.280

【例 1-1】 在容器中装淡水 3L，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 $V=3\text{L}=0.003\text{m}^3$ ，密度 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，容重 $\gamma=9800\text{N}/\text{m}^3$ 。

应用式 (1-2) 可得质量为 $m=\rho V=1000\times 0.003=3(\text{kg})$

应用式 (1-3) 得水的重量为 $G=\gamma V=9800\times 0.003=29.1(\text{N})$

【例 1-2】 在一个标准大气压下水和水银的容重分别为 $\gamma_{\text{水}}=9.8\text{kN}/\text{m}^3$ ， $\gamma_{\text{水银}}=133.28\text{kN}/\text{m}^3$ 。试求两种液体的密度各为多少？

解：根据公式求得

$$\text{水的密度} \quad \rho_{\text{水}} = \frac{\gamma_{\text{水}}}{g} = \frac{9800}{9.8} = 1000(\text{kg}/\text{m}^3)$$

$$\text{水银的密度} \quad \rho_{\text{水银}} = \frac{\gamma_{\text{水银}}}{g} = \frac{133280}{9.8} = 13600(\text{kg}/\text{m}^3)$$

四、液体的粘滞性

液体流动的过程中，其质点间存在相对运动，因此在流层间产生一种内摩擦力（也称粘滞力），以抵抗其相对运动产生的剪切变形，液体的这种性质称为粘滞性。

液体粘滞性的大小，常用粘滞系数 ν 和 μ 来表示， μ 称为动力粘滞系数，单位用 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 表示， ν 为运动粘滞系数，单位常用 m^2/s ， ν 是动力粘滞系数 μ 和液体密度 ρ 的比值，其计算式为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

不同的液体具有不同的粘滞系数，对于同一种液体，随着温度的变化，粘滞性的大小也随着改变，表 1-2 列出了不同温度时水的运动粘滞系数值。

表 1-2 不同温度时水的物理性质值

温度 (℃)	容重 γ (kN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	压缩系数 β ($10^{-9}1/\text{Pa}$)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.485
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.460
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483

由于粘滞性的存在,使得明渠水流中横断面上各点的流速分布不同,渠底流速小而表层流速大。渠底流速为零,离底越远,流速越大,至水面处流速最大。断面上某流线上的流速分布如图 1-1 所示。

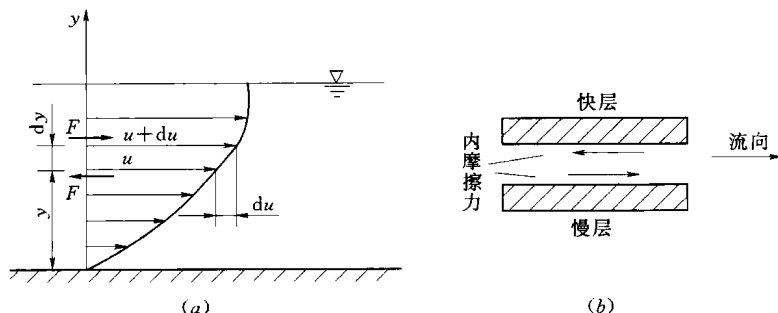


图 1-1

图 1-1 所示的流速分布表明:紧靠渠底的水层由于附着力作用而粘在渠底不动,该水层通过粘滞作用影响上面的第二层水的流速,第二层水又通过粘滞作用而影响第三层水的流速,依此类推,水面处受到的粘滞性影响最小,所以流速最大。同理可知管流中边壁处的流速最小,而管流中心处流速最大。

1686 年,根据试验牛顿提出:对于平行直线流动的牛顿液体,液体的内摩擦力 F 与液体的性质和温度有关,与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 和接触面积 A 成正比,与接触面上的压力无关,其表达式为

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

这就是牛顿内摩擦定律。式 (1-6) 中 μ 为动力粘滞系数。单位面积上的内摩擦力又称为粘滞切应力,以符号 τ 表示。

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

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

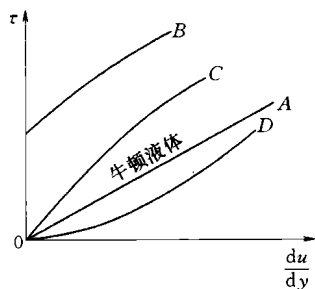


图 1-2

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。对于这类液体统称为非牛顿液体。

粘滞性是运动液体固有的特性,正因为液体具有粘滞性,所以液体在流动过程中就要克服内摩擦力做功,使能量不断减少而损失,损失的能量随着水流的运动变成热能而散失。所以粘滞性是液体产生能量损失的根本原因。

五、液体的压缩性

当液体受压后体积缩小的性质为液体的压缩性，当压力去掉以后，体积恢复原来状态的性质为弹性。

液体压缩性的大小可用体积压缩系数 β 来表示。设质量一定的液体，其体积为 V ，当压强增加 dp 时，体积相应减小 dV ，其体积的相对压缩值为 $\frac{dV}{V}$ ，则体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-8)$$

若用 K 来表示液体的体积弹性系数则

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-9)$$

体积弹性系数 β 越小， K 值越大，越不易压缩。在国际单位制中，体积压缩系数 β 的单位为 m^2/N 。不同种类液体的 β 值和 K 值不等，同一种类液体的 β 值和 K 值随温度和压强的变化而改变，但变化甚微，一般看作常数。水的可压缩性很小，如在 4°C 时，每增加一个大气压，水的相对缩小量还不足 $1/20000$ ，所以在一般的水力学问题中，认为水是不可压缩的。

六、液体的表面张力

在液体分子之间的引力作用下，液体与其他介质（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。

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 1-3 所示。由此可见，表面张力不仅存在于液体和气体接触面上，也产生在液体与固体的界面上。由于介质性质不同，表面张力使液体表面的表现形式也不同。如将细管插入水中，玻璃管与水接触，管内水面高于容器中液面，形成凹形曲面，如图 1-3 (a) 所示。若将细管插入水银中，则管中水银面低于容器内的水银面，而且水银面呈现凸形曲面，如图 1-3 (b) 所示。所以在水力学试验室中用的测压管内径不宜太小，一般以 $d \geq 10\text{mm}$ 的玻璃管为宜，否则应考虑由毛细管作用所带来的试验误差。由于表面张力很小，在水力计算中，一般不考虑。

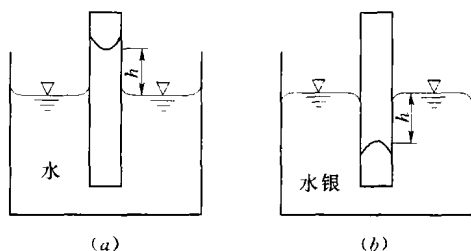


图 1-3

曲面，如图 1-3 (a) 所示。若将细管插入水银中，则管中水银面低于容器内的水银面，而且水银面呈现凸形曲面，如图 1-3 (b) 所示。所以在水力学试验室中用的测压管内径不宜太小，一般以 $d \geq 10\text{mm}$ 的玻璃管为宜，否则应考虑由毛细管作用所带来的试验误差。由于表面张力很小，在水力计算中，一般不考虑。

七、汽化压强与汽蚀

汽化是指液体分子运动速度足够大时从液面上不断逸出而成为蒸汽的现象。在一个大气压下，水温上升到 100°C 时就开始汽化；在压力小于一个大气压时，水温不到 100°C 就会汽化。这说明压力越小，水分子越容易从水中逸出而汽化。如果保持某一水温，逐步降低液面压强，当液面压强降低到某一数值时，水便开始汽化，此时的压强称为水在该温度下的汽化压强。