



高职高专“十一五”精品规划教材

水力学

主 编 赵建东 者建伦



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高职高专“十一五”精品规划教材

水力学

主 编 赵建东 者建伦
副主编 薛元奇 高向前
王金亭 王世策



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材为高职高专“十一五”精品规划教材,是为高等职业技术学院、普通高等专科学校水利水电工程等专业编写的全国统编教材。全书共分十五章,包括绪论,水静力学,水流运动的基本原理,水流形态与水头损失,有压管道中的水流运动,明渠恒定均匀流,明渠恒定非均匀流,泄水建筑物的水力计算,泄水建筑物下游水流衔接与消能,渠系连接建筑物的水力计算,高速水流简介,相似原理与水工模型试验基础,渗流基础,流体旋涡运动与流体绕叶栅流动简介,明渠非恒定流简介。各章有例题、习题和常用图表。

本书也适用于水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、道路与桥梁、水土保持、水电站动力设备、水电站建筑、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。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/赵建东, 者建伦主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2007
高职高专“十一五”精品规划教材
ISBN 978-7-5084-4790-2

I. 水… II. ①赵…②者… III. ①水利学—高等学校: 技术学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 132035 号

书 名	高职高专“十一五”精品规划教材 水力学
作 者	主编 赵建东 者建伦
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 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 22.5 印张 576 千字
版 次	2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	34.00 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

2005年《国务院关于大力发展职业教育的决定》中提出进一步深化职业教育教学改革,根据市场和社会需要,不断更新教学内容,改进教学方法,大力推进精品专业、精品课程和教材建设。教育部也在《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》([2006] 16号)中明确指出,课程建设与改革是提高教学质量的核心,也是教学改革的重点和难点,而教材建设又是课程建设的一个重要内容。教材是体现教学内容和教学方法的载体,是进行教学的基本工具,是学科建设与课程建设成果的凝结与体现,也是深化教育教学改革、保障和提高教学质量的重要基础。

编写高职教材,要明确高职教材的特征,如同高职教育的定位一样,高职教材应既具有高教教材的基本特征,又具有职业技术教育教材的鲜明特色。因此,应具有符合高等教育要求的理论水平,重视教材内容的科学性,既要符合人的认识规律和教学规律,又要有利于学生的学习,使学生在阅读时容易理解,容易吸收。做到理论知识的准确定位,既要根据“必需、够用”的原则,又要根据生源的实际情况,以学生为主体确定理论深度;在教材的编写中加强实践性教学环节,融入足够的实训内容,保证对学生实践能力的培养,体现高等技术应用性人才的培养要求。编写教材要强调知识新颖原则,教材编写应跟随时代新技术的发展,将新工艺、新方法、新规范、新标准编入教材,使学生毕业后具备直接从事生产第一线技术工作和管理工作的能力。编写时不能孤立地对某一门课程进行思考,而要从高职教育的特点去考虑,从实现高职人才培养目标着眼,从人才所需知识、能力、素质出发。在充分研讨的基础上,把培养职业能力作为主线,并贯穿始终。

《高职高专“十一五”精品规划教材》是为适应高职高专教育改革与发展的需要,以培养技术应用性的高技能人才的系列教材。为了确保教材的编写质量,参与编写人员都是经过院校推荐、编委会答辩并聘任的,有着丰富的教学 and 实践经验,其中主编都有编写教材的经历。教材较好地贯彻了新的法规、规程、规范精神,反映了当前新技术、新材料、新工艺、新方法和相应的岗位资格特点,体现了培养学生的技术应用能力和推进素质教育的要求,注重内容的科学性、先进性、实用性和针对性,力求深入浅出、循序渐进、强化应用,具有创新特色。

这套《高职高专“十一五”精品规划教材》的出版,是对高职高专教材建设的一次有益探讨,因为时间仓促,教材可能存在一些不妥之处,敬请读者批评指正。

《高职高专“十一五”精品规划教材》编委会

2006年11月

本书是为贯彻教育部在《2003~2007 年教育振兴行动计划》中提出的要实施“职业教育与创新工程”的精神,受中国水利水电出版社委托而组织编写的“十一五”精品规划教材。

本教材在编写过程中力求概念清晰、深入浅出、联系实际,理论上以适当够用为度,不苛求学科的系统性和完整性。力求结合专业,突出实用,体现高职高专教育的特色。在传承经典、成熟的理论基础上,尽可能编入新规范、新技术、新材料。本书采用了国家最新版本 2002 年出版的《水利技术标准汇编》中推荐的一些计算方法、公式,如:沿程水头损失计算公式、堰流计算公式等,也发现一些问题,如果完全采用标准中推荐的公式,较为复杂,有限的课时去讲授,特别费力,所以,只是编入一些相对简单的内容。

考虑到高职高专的新设专业,在满足水利工程、水利水电工程教学要求的基础上,同时参照水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、道路与桥梁、水土保持、水电站动力设备、水电站建筑、治河与防洪等专业教学大纲的要求,编入了部分带*号章节选讲的内容,以供各专业教学选用。

参加教材编写的人员有:山东水利职业学院者建伦、赵建东(第一章、第九章、第十章、第十五章),王金亭(第十章、第九章);福建水利电力职业技术学院王世策(第七章、第十二章、第十三章、第十五章);山西水利职业技术学院薛元奇(第二章、第五章、第六章、第八章);四川水利职业技术学院高向前(第三章、第四章、第十一章、第十四章)。本教材由山东水利职业学院赵建东、者建伦担任主编。

对在教材出版工作中中国水利水电出版社和各院校领导及

老师所给予的支持帮助表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 6 月



序
前言

第一章 绪论	1
第一节 水力学的任务及发展简史	1
第二节 液体的主要物理性质	2
第三节 连续介质和理想液体的概念	7
第四节 作用在液体上的力	8
第五节 水力学的研究方法	9
习题	10
第二章 水静力学	11
第一节 静水压强及其特性	11
第二节 静水压强的基本规律	12
第三节 静水压强的表示方法和测算	16
第四节 作用于平面壁上的静水总压力	22
第五节 作用于曲面壁上的静水总压力	27
* 第六节 浮力、浮体的平衡与稳定[水文]	30
习题	33
第三章 水流运动的基本原理	37
第一节 描述水流运动的两种方法	37
第二节 恒定总流连续性方程	42
第三节 恒定总流的能量方程	44
第四节 能量方程的应用	50
第五节 恒定总流的动量方程	58
* 第六节 相对运动的能量方程[水动、给水]	64
* 第七节 恒定总流的动量矩方程[水动、给水]	66
习题	68
第四章 水流型态与水头损失	71
第一节 水头损失的类型及其与阻力的关系	71
第二节 水流运动的两种流态	74
第三节 液流的层流运动	79

第四节 紊流运动	81
第五节 沿程水头损失的分析和计算	86
第六节 局部水头损失的分析与计算	93
第七节 绕流阻力与升力	97
习题	100
第五章 有压管道中的水流运动	102
第一节 概述	102
第二节 简单管道的水力计算	103
第三节 复杂管路水力计算	117
* 第四节 压力管道中的水击[水动]	128
习题	133
第六章 明渠恒定均匀流	136
第一节 概述	136
第二节 明渠均匀流的特性及其产生条件	139
第三节 明渠均匀流的计算公式及有关问题	140
第四节 渠道水力计算类型	147
* 第五节 渠道及河道糙率分析[水工、水文]	154
* 第六节 河渠均匀流断面上的流速分布[水工、水文]	157
习题	160
第七章 明渠恒定非均匀流	162
第一节 概述	162
第二节 明渠非均匀流的一些基本概念	163
第三节 缓流、急流的转换现象——水跌与水跃	170
第四节 明渠恒定非均匀渐变流基本方程	177
第五节 棱柱体渠道恒定非均匀渐变流水面线分析	179
第六节 明渠恒定非均匀渐变流水面线计算	184
* 第七节 天然河道中水面线的计算[水工、水文]	188
* 第八节 天然河道中恒定非均匀渐变流流量和糙率的计算[水工、水文]	196
第九节 弯道水流简介	199
习题	201
第八章 泄水建筑物的水力计算	205
第一节 概述	205
第二节 孔口与管嘴出流水力计算	206
第三节 堰流	210
第四节 闸孔出流的水力计算	226
* 第五节 桥涵水力计算[道桥、水工]	232
* 第六节 无压涵洞的水力计算[道桥、水工]	235
习题	239

第九章 泄水建筑物下游水流衔接与消能	241
第一节 底流式衔接与消能的水力计算	242
第二节 挑流消能的水力计算	253
习题	256
第十章 渠系连接建筑物的水力计算	258
第一节 明渠渐变段的水力计算	258
第二节 渡槽的水力计算	261
第三节 跌水的水力计算	263
习题	270
* 第十一章 高速水流简介[水工]	271
第一节 高速水流的压强脉动现象及对建筑物的影响	271
第二节 水工建筑物的气蚀问题	273
第三节 明渠高速水流掺气	275
第四节 明渠急流冲击波现象	278
习题	283
* 第十二章 相似原理与水工模型试验基础[水工]	284
第一节 概述	284
第二节 量纲分析	286
第三节 水流的相似原理和相似准则	288
第四节 水工模型设计与算例	295
习题	300
* 第十三章 渗流基础	302
第一节 渗流基本概念	302
第二节 渗流的基本定律——达西定律	305
第三节 地下河槽中的无压恒定均匀渗流	307
第四节 地下河槽中无压恒定非均匀渐变渗流	308
第五节 棱柱体地下河槽中恒定非均匀渐变渗流的浸润曲线	309
第六节 普通井及井群的渗流计算	313
第七节 水平不透水层上均质土坝的渗流计算	318
习题	320
* 第十四章 流体旋涡运动与流体绕叶栅流动简介[水动]	322
第一节 旋涡运动简介	322
第二节 流体绕叶栅流动简介	327
习题	332
* 第十五章 明渠非恒定流简介	334
第一节 明渠非恒定流特性	334
第二节 明渠非恒定渐变流的基本方程	336
第三节 瞬态法简介	341

附录.....	346
附录 I 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图	346
附录 II 梯形和矩形断面明渠底宽求解图	347
附录 III 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图	348
附录 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	349
参考文献	350

第一章 绪 论

本章要求

掌握：

液体的密度、容重、黏滞性、理想液体的定义，液体密度、容重的计算。

理解：

黏滞力、表面力、质量力、水力学的定义和任务。

第一节 水力学的任务及发展简史

一、水力学的任务

水力学是研究液体的机械运动规律及应用这些规律解决工程实际问题的一门科学。水力学研究对象是以水为代表的液体，其基本原理不仅适用于水，也适用于水的性质相似的液体（油、汞、酒精等）和可以忽略压缩性（即流速小于音速）的气体。水力学是力学的分支，包括水静力学和水动力学。

水静力学研究液体静止或相对静止状态下的力学规律及其应用，探讨液体内部压强分布，液体对固体接触面的压力，液体对浮体和潜体的浮力及浮体的稳定性，以解决蓄水容器，输水管渠，挡水建筑物，沉浮于水中的构筑物，如水池、水箱、水管、闸门、堤坝、船舶等的静水压力计算问题。

水动力学研究液体运动状态下的力学规律及其应用，主要探讨管流、明渠流、堰流、孔口流、射流、渗流的流动规律，以及流速、流量、水深、压力、水工建筑物结构尺寸的水力计算，以解决给水排水、道路桥涵、农田排灌、水力发电、防洪排涝、河道整治、水资源工程、环境保护工程、港口工程、航运、交通和石油化工中的水力学问题。

随着经济建设的发展，水力学学科衍生了一些新的分支，如研究河床演变问题的动床水力学，在计算机基础上产生出的计算水力学，研究环保问题产生出的环境水力学以及生态水力学、随机水力学等。

虽然在工程中所遇到的水力学问题各式各样，但基本问题可以归结为如下几个方面：

- (1) 计算水流对建筑物的作用力。
- (2) 计算建筑物的输水能力及尺寸。
- (3) 水流机械能的利用和损失。
- (4) 计算河渠水面曲线。
- (5) 建筑物下游水流衔接与消能。
- (6) 建筑物的渗流。

此外，还有一些特殊水力学问题，如管、渠非恒定流，高速水流中的空蚀、振动、掺



气、挟沙水流、波浪运动等。水力学的任务是研究液体的机械运动规律并应用这些规律去解决工程中的各类水力学问题。

二、水力学发展简史

水力学作为学科而诞生始于水静力学。公元前 400 余年，中国墨翟在《墨经》中，已有了浮力与所排液体体积之间关系的设想。公元前 250 年，阿基米德在《论浮体》中，阐明了浮体和潜体计算方法。1586 年德国数学家斯蒂文提出水静力学方程。17 世纪中叶，法国帕斯卡提出液压等值传递的帕斯卡原理。至此，水静力学已初具雏形。

水力学的发展是与水利工程兴建相联系的。相传 4000 年前的大禹治水采取“疏雍导滞”防止了洪涝灾害。公元前 256~公元前 210 年，中国秦代修建了著名的都江堰、灵渠和郑国渠。汉初利用山溪水流作动力是水轮机的雏形。15 世纪意大利人达·芬奇在实验水力学方面取得进展，他用悬浮沙粒在玻璃槽中观察水流现象，描述了波浪运动、管中水流和波的传播、反射和干涉。前人对水流运动规律的认识已有相当水平，但直至 15 世纪以前，都被认为是一种技艺，而未发展为一门科学。

18 世纪中叶，水力学开始成为一门独立学科。水力学得到迅速的发展，欧拉和丹尼尔·伯努利是这一领域中杰出的先驱者。18 世纪末和整个 19 世纪，形成了两个相互独立的研究方向：一是运用数学分析的理论流体力学；二是依靠实验的应用水力学。开尔文、瑞利、斯托克斯、兰姆等人的工作使理论水平达到相当的高度，而谢才、达西、巴赞、弗朗西斯、曼宁等人则在应用水力学方面进行了大量的实验研究，提出了各种实用的经验公式。

19 世纪末，流体力学有了新发展：雷诺理论及实验研究；雷诺的因次分析；弗劳德的船舶模型实验；空气动力学的研究等。

20 世纪初的重要突破是普朗特的边界层理论，它把无黏性理论和黏性理论在边界层概念的基础上联系起来。20 世纪蓬勃发展的经济建设提出了越来越复杂的水力学问题：高浓度泥沙河流的治理；高水头水力发电的开发；输油干管的敷设；采油平台的建造；河流湖泊海港污染的防治等。使水力学的研究方向不断拓展，从定床水力学转向动床水力学；从单向流动到多相流动；从牛顿流体规律到非牛顿流体规律；从流速分布到温度和污染物浓度分布；从一般水流到产生掺气、空蚀，引起振动的高速水流；以计算机应用为主要手段的计算水力学也得到了相应的发展。现在，水力学课程已由过去单纯为水利工程类专业的一门重要的专业基础课，发展成为土木工程、环境工程、动力机械、生物化学、以至人才流、物资流、资金流、信息流等专业或领域的重要专业基础课。也就是说，所有与流体或与流动有关的问题，都离不开水力学的基本理论。随着现代科学技术的发展和不同学科的相互渗透，水力学的内容将会不断得到发展、充实和提高。

第二节 液体的主要物理性质

自然界的物质一般有三种形式，即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。固体分子的间距很小，内聚力很大，所以它能保持固定的形状和体积，承受一定的拉力、压力和剪切力。流体则不同，由于流体分子间距较大，内聚力较小，几乎不能承受拉力，所以流体不能保持固定的形状。

液体与气体相比，液体分子间的距离比气体小，内聚力比气体大得多，所以能保持一定的体积。气体没有固定的形状，也没有一定的体积，极易膨胀和压缩，液体的压缩性很小，



气体和液体的主要区别就是它们的可压缩程度不同。

因此,液体是易流动的、不易被压缩的。

液体运动状态的改变,一方面是受外力作用的结果;另一方面取决于液体自身的物理性质。所以,在研究液体的机械运动规律之前,应首先了解液体的物理特性。

一、液体的惯性、质量和密度

惯性是物体反抗外力改变它原有运动状态的特性,惯性力是物体反抗外力改变它原有运动状态而加给施力物体的反作用力。质量是物体惯性大小的量度,质量越大,物体的惯性也越大。物体的质量用符号 m 表示,加速度用符号 a 表示,则惯性力可以表示为

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

式中负号表示惯性力的方向与物体运动加速度的方向相反。

密度是指单位体积液体具有的质量,液体的密度用符号 ρ 表示。对于均质液体,质量用符号 m 表示,单位为 kg ,体积用符号 V 表示,单位为 m^3 其密度为

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

密度的单位为 kg/m^3 。密度的大小会随温度和压强而变化,但这种变化很小,水力学中通常把液体的密度视为常数。例如水的密度,工程中采用在一个标准大气压下,温度为 4°C 时的值作为计算值,其数值为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。不同温度下水的密度见表 1-1。

每一个物理量都包含有量的单位和数值两部分。单位是度量物理量的基准,单位不同,物理量的数值也不同。本书采用我国推荐使用的国际单位制 (SI),它的基本单位为: m , s , kg , 其他是导出单位。例如,力的单位为 N , 1 牛顿力的定义为:使质量为 1kg 的物体得到 $1\text{m}/\text{s}^2$ 加速度的力,基本单位表示: $1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

二、液体的万有引力特性、重力与容重

万有引力特性是指任何物体之间相互具有吸引力的性质,其中地球对物体的万有引力称为重力,用符号 G 表示,物体的质量用符号 m 表示,重力加速度为 g ,则它所受到的重力为

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

重力的单位为 N 或 kN ,重力加速度 g 随纬度及高度的变化而变化,但因其变化很小,水力学中常将其当成常数,取 $g = 9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。单位体积液体所具有的重量称为容重,以 γ 表示。对于某一重量为 G ,体积为 V 的均质液体,其容重为

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

根据式 (1-3) 和式 (1-4) 可得

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-5)$$

容重的单位为 N/m^3 或者 kN/m^3 。液体的容重随温度和压强的改变而变化,但变化很小,工程上一般将其视为常数,水的容重 $\gamma = 9800\text{N}/\text{m}^3$,不同温度下水的物理性质 (1 个标准大气压) 见表 1-1。

【例 1-1】 知某液体体积为 6m^3 ,密度为 $983.3\text{kg}/\text{m}^3$,求该液体的质量和容重。

解:由式 (1-2) 得液体的质量 $m = \rho V = 983.3 \times 6 = 5899.8 (\text{kg})$

由式 (1-5) 得液体的容重 $\gamma = \rho g = 983.3 \times 9.80 = 9636.3 (\text{N}/\text{m}^3)$



表 1-1

不同温度下水的物理性质 (1 个标准大气压)

温度 (°C)	容重 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	动力黏滞系数 μ (10 ⁻³ N·s/m ²)	运动黏滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	体积弹性数 κ (10 ⁹ N/m ²)	表面张力系数 σ (N/m ²)	汽化压强 (kN/m ²)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.0756	0.60
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749	0.87
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742	1.18
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735	1.70
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728	2.34
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720	3.17
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712	4.24
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696	7.38
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679	12.16
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662	19.91
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644	31.16
80	9.530	971.8	0.345	0.364	2.20	0.0626	47.34
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608	70.10
100	9.339	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589	101.33

三、液体的黏滞性

我们在物理学中已经了解到,当固体与固体之间存在相对运动时,就会在其接触面上产生摩擦力来反抗其相对运动,直到两个固体之间处于静止平衡状态。这种摩擦力是产生在两个固体之间的外力。

当液体处在运动状态时,如果液体内部质点之间存在着相对运动,那么液体质点之间就要产生一种摩擦力来反抗液体做相对运动,液体的这种性质称为液体的黏滞性,因这种摩擦力产生在液体的内部,所以称它为内摩擦力。内摩擦力也称为黏滞力。由于黏滞

性的存在,液体在运动过程中要克服内摩擦力做功而消耗能量,所以黏滞性是液体在流动过程中产生能量损失的根源。图 1-1 中液体沿固体壁面做平行直线流动,而且液体质点是一层一层有规则地向前流动,互相不混掺(液体的这种运动状态称为“层流运动”)。由于固体引力及液体黏滞性的影响,固体壁面上的液体流速等于

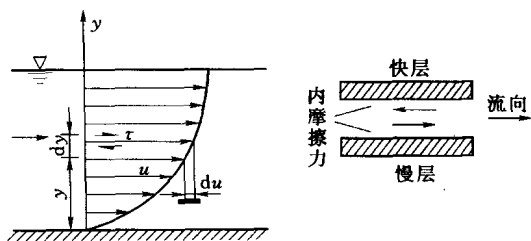


图 1-1

零,离边界越远,流速越大。若距固体边界 y 处的流速为 u ,相邻液层 $y+dy$ 处液体的流速为 $u+du$,由于两相邻液层的流速不同,即存在相对运动,两液层之间将成对地产生内摩擦力。下层液体流速小,它作用于上层液体一个与流速方向相反的摩擦力,力图使其减速;而上层液体流速大,它对下层液体作用有一个与流速方向一致的摩擦力,使其流动加速。这两个摩擦力大小相等、方向相反。

实验证明,相邻液层单位接触面积上所产生的内摩擦力(即切应力 τ)的大小,与两液层间的流速差 du 成正比,与两液层之间的距离 dy 成反比,同时与液体的性质有关。用公



式表示即为

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

若两液层间的接触面积为 A ，则其内摩擦力为

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

其中， μ 是反映液体黏滞特性的比例系数，称为动力黏滞系数。两液层流速差与其距离的比值 $\frac{du}{dy}$ 称为流速梯度。

式 (1-6) 和式 (1-7) 就是著名的牛顿内摩擦定律表达式，具体内容可以表述如下：作层流运动的液体，当相邻液层间存在相对运动，则液层之间内摩擦力的大小，与接触面积 A 和流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比，同时与液体的性质有关。

动力黏滞系数 μ 的大小表示液体黏滞性的强弱，黏滞性大的液体 μ 值较大，黏滞性小的液体 μ 值较小。 μ 的单位： $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

水力学中经常使用 μ 和液体密度 ρ 的比值，即

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

式中 ν ——运动黏滞系数， m^2/s 或 cm^2/s 。

液体的黏滞系数与液体的种类有关，它对温度的变化较为敏感，但压强的变化对它影响很小，通常不予考虑。

水的运动黏滞系数 ν 可按下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.00022t^2} \quad (1-9)$$

式中 t ——水温， $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-1 列出了不同温度时，水的黏滞系数 ν 和 μ 值，其中 ν 以 cm^2/s 计。

注意：牛顿内摩擦定律的适用条件是指层流运动的牛顿流体，如水、空气、各种油类、酒精、汞等。牛顿流体是指 τ 与 $\frac{du}{dy}$ 之间存在线性关系的流体。对非层流状态下的“牛顿流体”或“非牛顿流体”（血浆、泥浆、尼龙、橡胶的溶液、颜料、油漆等）不再适用。

【例 1-2】 如图 1-2 所示，面积为 0.5m^2 的平板在水面上以速度 $u=1\text{m/s}$ 沿水平方向运动，水层的厚度 $\delta=2\text{mm}$ ，假设水层内的流速按直线分布，水的温度为 10°C ，求平板受到的阻力。

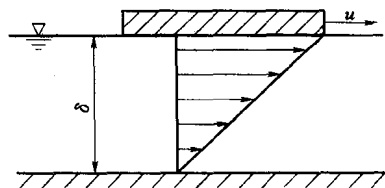


图 1-2

解，因为水层内的流速按直线分布，则流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 等于常数

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{0.002} = 500 (\text{L/s})$$

查表 1-1，当温度为 10°C ，水的动力黏滞系数 $\mu=1.307 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。根据牛顿内摩擦定律表达式，平板所受的阻力为：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = 1.037 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 500 = 0.327 (\text{N})$$



四、液体的压缩性

液体不能承受拉力，但可承受压力。液体受压后体积要缩小，压力撤除后能恢复原状，这种性质称为液体的压缩性或弹性。液体压缩性的大小用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来表示。

设某液体在受压强 p 时，体积为 V ，当压强增加 dp 后，体积改变了 dV ，则液体的体积压缩系数 β 可以表示为

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

式中 $\frac{dV}{V}$ ——液体体积的相对变化值。

当压强增大 (dp 为正)，体积必定减小 (dV 为负)，反之亦然，也就是说 dp 和 dV 始终正负号相反。为了保持 β 值为正数，在上式右端加一个负号。根据式 (1-10) 可知， β 值越大，表明液体越容易被压缩。体积压缩系数 β 的单位为： m^2/N 。 β 的倒数称为体积弹性系数，用 K 表示，即

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

式 (1-11) 表明， K 值越大，液体越不易被压缩。当 $K \rightarrow \infty$ ，表示液体绝对不可压缩，即不存在弹性变形。 K 的单位与压强相同，为 N/m^2 。不同种类的液体， β 和 K 值也不同，同一种液体的 β 和 K 值也随温度和压强而变化，但变化甚微，一般可视为常数。水的体积弹性系数（简称弹性系数）可以取 $K = 2.1 \times 10^9 N/m^2$ 。也就是说，每增加一个大气压，水的体积相对减少约为两万分之一。

对一般工程问题，可以认为水是不可压缩的。但在压强变化大而且迅速的水力过程中，如输水管路中的水击问题，就必须考虑水的压缩性。

五、液体的表面张力特性

液体的表面张力是指液体自由表面上的分子，一侧受液体分子的引力，而另一侧受其他介质（如气体或固体）的引力，由于两侧分子引力不平衡，使自由面上的液体分子受到微小拉力，这种拉力称为液体的表面张力。

表面张力仅在自由表面存在，而且沿液体表面的切线方向，它将会影响液体表面的形状。由于表面张力很小，一般对液体的宏观运动影响可以忽略不计，只有在某些特殊情况下，如研究微小水滴的形成与运动、小尺度水力模型中的水流、水舌较薄而且曲率较大的堰流、细管中的水或土壤空隙中水的运动等，都必须考虑表面张力的影响。

在小直径细管中，液体表面张力的现象十分明显，如图 1-3 所示。当液体内的引力小于它与管壁的附着力，表面张力将使细管内液面下凹、液体上升。反之，当液体内的引力大于它与管壁的附着力，表面张力将使细管内液面上凸、液体下降。

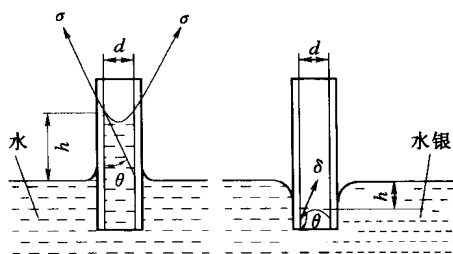


图 1-3

图 1-3 中 σ 表示自由液面单位长度上所受拉力的数值， θ 为液面与固体壁面的接触角，沿管壁圆周上表面张力的垂直分力应该与升高液柱的重量相等，一般情况下，水与玻璃的接触角 $\theta \approx 0^\circ$ ，水