

国家示范院校重点建设专业

水利水电建筑工程专业课程改革系列教材

水力分析与计算

◎ 主 编 陈明杰 潘孝兵

◎ 主 审 郭志强

1.4



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家示范院校重点建设专业

水利水电建筑工程专业课程改革系列教材

水力分析与计算

◎ 主 编 陈明杰 潘孝兵

◎ 主 审 郭志强



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是借鉴国外先进职业教育理念,以工作过程为导向为安徽水利水电职业技术学院国家重点建设专业——水利水电建筑工程专业课程改革而设置的一个学习领域,以安徽省已建、在建、病险水库加固的水利枢纽工程为载体,以专业核心课程《水闸设计与施工》、《土石坝设计与施工》中的案例为实例,与核心课程紧密结合,包括:水工建筑物壁面静荷载分析与计算,有压管道的水力分析与计算,渠(河)道水力分析与计算,堰、闸泄流能力分析与计算,泄水建筑物下游消能计算,渗流基础。各项目配有例题、常用图表和技能训练题。

本教材适用于高职院校水利水电建筑工程、水利工程、水文水资源工程、给水排水、城市水利、水土保持、治河与防洪等专业的教学,并可用于成人专科学校同类专业教学,还可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力分析与计算 / 陈明杰, 潘孝兵主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.3

(国家示范院校重点建设专业、水利水电建筑工程专业课程改革系列教材)

ISBN 978-7-5084-7298-0

I. ①水… II. ①陈… ②潘… III. ①水力计算—高等学校—教材 IV. ①TV131.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第038528号

书 名	国家示范院校重点建设专业 水利水电建筑工程专业课程改革系列教材 水力分析与计算
作 者	主编 陈明杰 潘孝兵 主审 郭志强
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.5印张 280千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	23.00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

前 言

本教材是为贯彻教育部在《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，是国家示范院校重点建设专业——水利水电建筑工程专业的课程改革成果之一。人才培养模式的改革是专业改革的重中之重，本专业的改革实施方案是借鉴国外的先进职业教育模式，结合安徽水利水电建设基本情况，构建的以工作过程为导向的人才培养课程方案。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，力求结合专业课，突出实用，体现高职高专教育的特色。在传承经典、成熟理论的基础上，编入了新规范、新技术、新材料。

本书特色：

1. 本教材均采用我国《水利技术标准汇编》和《室外给水规范》中推荐的计算方法、公式，使学生毕业后就能直接参与工程水力计算。

2. 每个项目前都设有“技能目标”，目的是让学生清楚该项目应该学会的职业技能是什么。每个项目后面都设有“技能训练题”，包括记公式、会计算、记概念。明确具体地告诉学生每个项目应记住哪些公式和概念，避免了通常使用“掌握、理解”等比较笼统的说法。

3. 以工程案例为载体，构成了一个完整的实训工作过程。在编写过程中，依托真实的学习情境，配套综合实训项目；注重学生的职业能力训练和个性培养，坚持学生知识、能力、素质协调发展，力求实现学生由“会干”向“能干”转变、教学过程“以教师演示为主”向“以学生动手实作为主”转变、理论和实践分开教学向两者融于工作过程教学转变。

参加教材编写的人员有：

绪论 水力分析与计算概述	安徽水利水电职业技术学院	董相如
项目 1 水工建筑物壁面静荷载分析与计算	安徽水利水电职业技术学院	董相如
项目 2 有压管道的水力分析与计算	安徽水利水电职业技术学院	陈明杰
项目 3 渠（河）道水力分析与计算	安徽水利开发总公司	吴继成
项目 4 堰、闸泄流能力分析与计算	安徽水利水电职业技术学院	潘孝兵
项目 5 泄水建筑物下游消能计算	安徽水利开发总公司	徐小娥
项目 6 渗流基础	安徽水利水电职业技术学院	董相如

本教材由安徽水利水电职业技术学院陈明杰、潘孝兵主编并统稿，安徽水利科学研究院郭志强主审，对在编写过程中给予支持、帮助的同仁表示诚挚的感谢。对在教材出版工作中院校领导、专家以及中国水利水电出版社所给予的支持、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，编者不胜感激。

编者

2010 年 2 月 5 日

目 录

前言

绪论 水力分析与计算概述	1
情境 0.1 水力分析与计算的任务、研究对象及发展概况	1
情境 0.2 液体的主要物理力学性质	3
情境 0.3 作用于液体上的力	7
技能训练题	9
项目 1 水工建筑物壁面静荷载分析与计算	10
情境 1.1 静水压强及其特性	10
情境 1.2 重力作用下静水压强分布规律	12
1.2.1 重力作用下静水压强的基本公式	12
1.2.2 压强的量度	13
1.2.3 水头和单位势能	15
1.2.4 压强的量测和点压强的计算	15
情境 1.3 平面上的静水总压力	17
1.3.1 静水压强分布图	17
1.3.2 利用压强分布图求矩形平面上的静水总压力	18
1.3.3 用解析法求任意平面上的静水总压力	19
情境 1.4 曲线上的静水总压力	21
技能训练题	24
项目 2 有压管道的水力分析与计算	29
情境 2.1 有压管道水力分析一	29
2.1.1 水流运动基本概念及其分类	29
2.1.2 恒定流的连续性方程	31
情境 2.2 有压管道水力分析二	32
情境 2.3 有压管道水力分析三	36
2.3.1 水头损失产生的原因及其分类	36
2.3.2 沿程水头损失的分析与计算	37
情境 2.4 有压管道水力分析四	41
2.4.1 恒定流动量方程式的建立	41
2.4.2 动量方程的应用条件和解题步骤	42

情境 2.5	有压管道水力分析五	43
2.5.1	管流的定义、特点	44
2.5.2	管流的分类	44
2.5.3	管流的计算类型	45
情境 2.6	有压管道中简单管道的水力计算	45
2.6.1	简单短管的水力计算	45
2.6.2	管径的确定	47
2.6.3	总水头线和测压管水头线的绘制	49
情境 2.7	有压隧洞的水力计算	51
2.7.1	有压隧洞的计算公式	52
2.7.2	有压隧洞的水力计算内容	52
情境 2.8	倒虹吸管的水力计算	54
2.8.1	工程案例	55
2.8.2	工程案例分析	55
2.8.3	工程案例计算	57
情境 2.9	水泵的工作原理分析与计算	58
2.9.1	离心泵工作原理	58
2.9.2	基本工作参数	58
2.9.3	基本方程及特性曲线	59
情境 2.10	长管的水力计算	63
2.10.1	简单管路	63
2.10.2	串联管路	68
2.10.3	并联管路	69
	技能训练题	70
项目 3	渠（河）道水力分析与计算	77
情境 3.1	渠道水力分析	77
3.1.1	明渠的分类	77
3.1.2	明渠均匀流的特征和形成条件	79
情境 3.2	明渠均匀流的基本公式	79
3.2.1	基本公式	79
3.2.2	过水断面的水力要素	80
情境 3.3	明渠水力计算中的几个问题	82
3.3.1	糙率 n 的选定	82
3.3.2	水力最佳断面和实用经济断面	84
3.3.3	渠道的允许流速	86
情境 3.4	渠道过流能力计算及断面尺寸设计	88
3.4.1	直接求解法	88

3.4.2	试算法	89
情境 3.5	复式断面渠道的水力计算	90
情境 3.6	渡槽水力计算	92
3.6.1	槽身段的水力计算	92
3.6.2	进口渐变段的水力计算	93
3.6.3	出口渐变段的水力计算	94
3.6.4	进出口底板高程的确定	94
情境 3.7	明渠水流的三种流态	96
情境 3.8	断面比能与临界水深	99
3.8.1	面比能、比能曲线	99
3.8.2	临界水深	102
3.8.3	临界底坡、缓坡和陡坡	103
情境 3.9	水跃与水跌	105
3.9.1	水跃	105
3.9.2	水跌	110
情境 3.10	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	110
3.10.1	微分方程讨论	111
3.10.2	水深沿流程变化的微分方程	111
情境 3.11	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线分析	112
3.11.1	渐变流水面线的变化规律	113
3.11.2	渐变流水面曲线分析步骤	115
情境 3.12	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线计算	118
3.12.1	人工渠道水面曲线的计算	118
3.12.2	工程案例介绍	119
3.12.3	工程案例计算	119
	技能训练题	121
项目 4	堰、闸泄流能力分析与计算	125
情境 4.1	堰流特性与类型的分析判断	125
情境 4.2	堰流基本公式的理解与分析	126
情境 4.3	实用堰流过流能力计算	128
情境 4.4	宽顶堰流基本公式的应用	129
情境 4.5	闸下出流基本公式的应用	132
	技能训练题	134
项目 5	泄水建筑物下游消能计算	136
情境 5.1	泄水建筑物下游水流衔接与消能的形式确定	136
情境 5.2	底流式衔接与消能的水力计算	138
5.2.1	收缩断面水深的 h_c 计算	138

5.2.2	水跃衔接形式的判断	141
情境 5.3	消力池水力计算	142
5.3.1	挖深式消力池的水力计算	143
5.3.2	坎式消力池的水力计算	146
5.3.3	底流式衔接与消能微机求解法简介	148
5.3.4	底流式消能的其他形式及辅助设施	153
	技能训练题	156
项目 6	渗流基础	157
情境 6.1	概述	157
6.1.1	渗流理论的工程应用	157
6.1.2	水在土壤中的状态	157
6.1.3	岩土分类及其渗透性质	158
情境 6.2	渗流基本定律	158
6.2.1	渗流模型	158
6.2.2	达西定律	159
6.2.3	细管概化模型	159
6.2.4	渗流系数的确定	160
情境 6.3	均匀渗流和非均匀渗流	160
6.3.1	恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流流速沿断面均匀分布	160
6.3.2	渐变渗流的基本微分方程和浸润曲线	161
情境 6.4	井和集水廊道	164
6.4.1	集水廊道	164
6.4.2	潜水井（无压井）	164
6.4.3	自流井	166
6.4.4	大口井与排水基坑	167
6.4.5	渗水井与河边井	167
	技能训练题	169
附录	170
附录 I	梯形和矩形断面明渠正常水深求解图	170
附录 II	梯形和矩形断面明渠底宽求解图	171
附录 III	梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图	172
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	173
参考文献	174

绪论 水力分析与计算概述

情境 0.1 水力分析与计算的任务、研究对象及发展概况

水力分析与计算是介于基础课和专业课之间的一门技术基础课，属力学的一个分支。主要研究以水为主的液体平衡和机械运动规律及其实际应用。一方面根据基础科学中的普遍规律，结合水流特点，建立基本理论，同时又紧密联系工程实际，发展学科内容。

1. 水力分析与计算的任务及研究对象

水力分析与计算所研究的基本规律，主要包括两部分：①液体的平衡规律，研究液体处于平衡状态时，作用于液体上的各种力之间的关系，称为水静力学；②液体的运动规律，研究液体在运动状态时，作用于液体上的力与运动之间的关系，以及液体的运动特性与能量转化等，称为水动力学。水力分析与计算所研究的液体运动是指在外力作用下的宏观机械运动，而不包括微观分子运动。水力分析与计算在研究液体平衡和机械运动规律时，须应用物理学和理论力学中的有关原理，如力系平衡定理，动量定理，能量守恒与转化定理等，因为液体也同样遵循这些普遍的原理。所以物理学和理论力学知识是学习水力分析与计算课程必要的基础。

水力分析与计算课程的主要内容为水工建筑物壁面静荷载分析与计算、有压管道的水力分析与计算、渠（河）道水力分析与计算、堰、闸泄流能力分析与计算、泄水建筑物下游消能计算、渗流基础项目等，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、渗流、高速水流等。

2. 水力分析与计算应用领域及学习目的

水力分析与计算在实际工程中有广泛的应用，如农业水利、水力发电、交通运输、土木建筑、石油化工、采矿冶金、生物技术以及信息、物资、资金等流动问题，都需要水力学的基本原理。图 0.1 为水力枢纽布置示意图，其建筑包括混凝土坝 [图 0.2 (a)]、土坝 [图 0.2 (b)]、泄洪闸、发电站、船闸等。对于挡水坝，为了坝的安全，须计算水对坝的作用力、水通过坝基的渗流量、溢洪道流量及尺寸，以及防止闸、坝泄流冲刷河道的消能计算，闸门尺寸及过流能力计算，泄洪隧道尺寸及过流能力计算，坝前水面曲线计算（以估算建坝后水库的淹没范围）。在土建工程中，如城市的生活和工业用水，一般都是由水厂集中供应的，水厂用水泵把河流，湖泊或水井中的水抽上来，经过净化处理后，再经过管路系统把水送到各用户。有时为了均衡用水负荷，还需修建水塔。仅这一供水系统，就要解决一系列水力学问题，如取水口和管路的布置，管径和水塔高度计算，水泵容量和井的产水量计算等。

随着工农业生产的发展和城市化进程，交通运输业也在飞速发展。在修建铁路公路，开凿航道，设计港口等工程时，也必须解决一系列水力学问题。如桥涵孔径计算，站场路基排水设计，隧洞通风排水设计等。

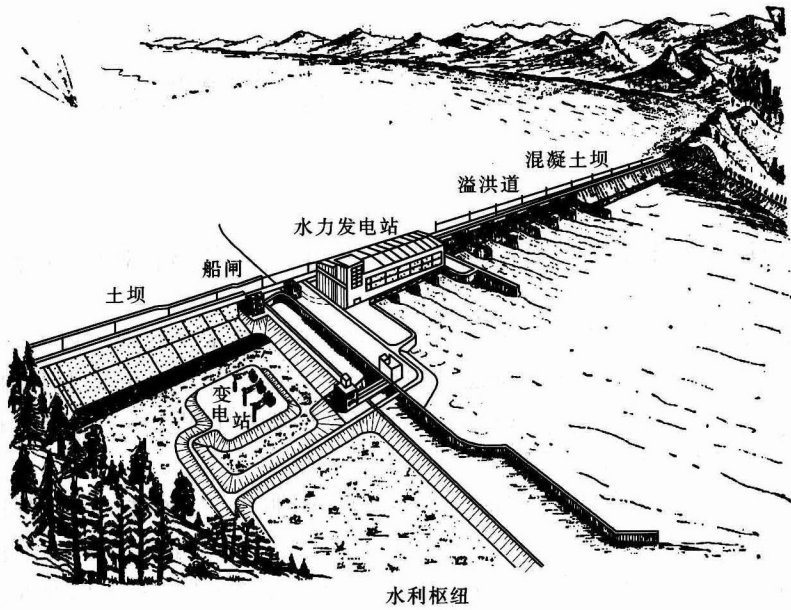


图 0.1

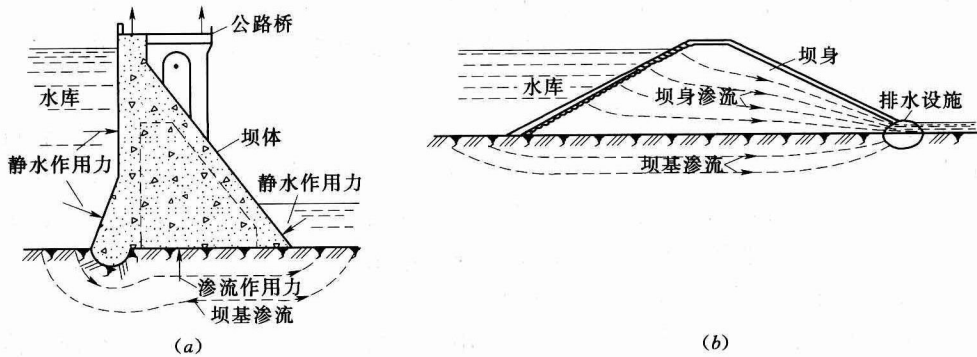


图 0.2

随着科学技术的发展，正在不断出现新的研究领域，如环境水力学、生态水力学、灾害水力学，以及人流、物流、车流、资金流和信息流等。学习水力学的目的，是学习它的基本理论，基本方法和基本技能，以期获得分析和解决有关水力学问题的能力，为进一步的科学研究打下基础。学习水力分析与计算的目的：一是培养学生的职业技能，如计算水对建筑物的压力，设计城镇给水排水管网，设计灌溉网、渠，进行泵站、电站的水力计算，虹吸管、渡槽、洞涵、消能的水力计算等，为走向工作岗位奠定坚实的业务基础；二是为专业课及后续专业课如土木建筑物、给水排水、水文学、城市水务、水电站、港航、农业排灌等打下理论基础。

3. 水力分析与计算发展简史

4000年前的大禹治水就已表现出古人的治水智慧。公元前400余年，中国的墨翟在《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。15 世纪，意大利人达·芬奇在实验水力学方面取得进展。1586 年德国数学家斯蒂文提出水静力学方程。15 世纪以前，工程水力学被认为是一种技艺，而未发展成一门科学。17 世纪中叶，法国人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。工程水力学作为学科而诞生始于水静力学。

18 世纪中叶，水力学才成为一门独立学科。欧拉和伯努利是这一领域杰出的先驱者。18 世纪末和整个 19 世纪形成了两个独立的研究方向：一是运用数学分析的理论水平达到相当的高度；二是谢才、达西、曼宁等人在应用水力学方面进行了大量的试验研究，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，如雷诺理论及试验研究，雷诺的因次分析，佛汝德的船舶模型试验，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。水力学的研究方向不断拓展，现代水力学课程已由水利类专业重要的专业基础课拓展为土木工程、环境工程、动力机械、生物化学，以至人才流、物流、资金流、信息流等专业活领域的重要专业基础课，所有与流体或与流动有关的问题，都需用到工程水力学的基本理论。

情境 0.2 液体的主要物理力学性质

水力学是研究液体机械运动规律的科学。本节仅讨论液体与机械运动有关的主要物理力学性质。

1. 惯性、质量和密度

(1) 惯性：液体具有保持原有运动状态的物理性质。

(2) 质量 (m)：质量是惯性大小的量度。

(3) 密度 (ρ)：单位体积所包含的液体质量。

若质量为 M ，体积为 V 的均质液体，其密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (0-1)$$

对于非均匀质液体

$$\rho = \rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (0-2)$$

密度的单位： kg/m^3 。

液体的密度随温度和压力变化，但这种变化很小，所以水力学中常把水的密度视为常数，即采用一个大气压下 4°C 纯净水的密度 ($\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$) 作为水的密度。

2. 重力和重度

(1) 重力 (G)：液体受到地球的万有引力作用，称为重力。

$$G = Mg \quad (0-3)$$

式中： g 为重力加速度。



(2) 重度(γ): 单位体积液体的重力称为重度或容重。

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (0-4)$$

重度的单位: N/m^3 , 液体的重度也随温度变化。空气和几种常见液体的重度见表 0.1。

表 0.1 空气和几种常见液体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度 (N/m^3)	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
测定温度 ($^{\circ}C$)	20	0	15	15	20	15

在 1 个大气压下, 纯净水的密度和重度随温度的变化见表 0.2。

表 0.2 水的密度和重度

$t(^{\circ}C)$	0	4	10	20	30
密度 (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
重度 (N/m^3)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57
$t(^{\circ}C)$	40	50	60	80	100
密度 (kg/m^3)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度 (N/m^3)	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

在水力计算中, 常取 $4^{\circ}C$ 纯净水的重度作为水的重度, $\gamma=9800N/m^3$ 。

3. 黏性和黏度

黏性: 液体抵抗剪切变形(相对运动)的物理性质。

当液体处在运动状态时, 若液体质点之间(或流层之间)存在相对运动, 则质点之间将产生一种内摩擦力来抗拒这种相对运动。液体的这种物理性质称为黏性(或黏滞性)。

由于液体具有黏性, 液体在流动过程中就必须克服流层间的内摩擦力做功, 这就是液体运动必然要损失能量的根本原因。因此液体的黏性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

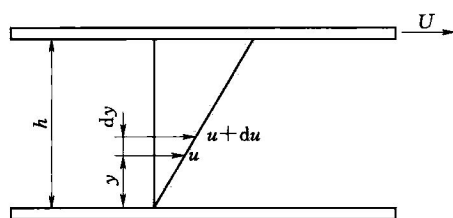


图 0.3

1686 年, 著名科学家牛顿做了如下试验:

在两层很大的平行平板间夹一层很薄的液体(图 0.3), 将下层平板固定, 而使上层平板运动, 则夹在两层平板间的液体发生了相对运动。

实验发现, 两层平板间液体的内摩擦力 F , 与接触面积 A 成正比, 与液体流动梯度 du/dy 成正比, 即

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (0-5)$$

引入比例系数 μ , 可将上式写成等式

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (0-6)$$

这就是著名的牛顿内摩擦定律。

式中 μ 称为动力黏度(或动力黏性系数)。 μ 值大小与液体种类和温度有关。黏性大的液体 μ 值高, 黏性小的液体 μ 值低。



牛顿内摩擦定律，也可用单位面积上的内摩擦力 τ 来表示

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (0-7)$$

可以证明：流速梯度 $\frac{du}{dy}$ ，实质上代表液体微团的剪切变形速率。

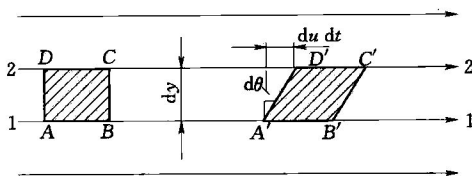


图 0.4

如图 0.4 所示。从图 0.3 中将相距为 dy 的两层液体 1—1 及 2—2 分离出来，取两液层间矩形微团 $ABCD$ ，经过 dt 时段后，该液体微团运动至 $A'B'C'D'$ 。因液层 2—2 与液层 1—1 间存在流速差 du ，微团除平移运动外，还有剪切变形，即由矩形 $ABCD$ 变成平行四边形 $A'B'C'D'$ 。 AD 或 BC 都发生了角变位 $d\theta$ ，其角变形速率为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。因为 dt 为微分时段， $d\theta$ 也为微量，可认为

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

故

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$$

因此，式 (0-7) 又可写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (0-8)$$

表明黏性也是液体抵抗角变形速率的能力。

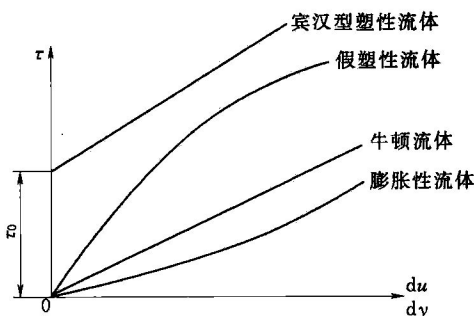


图 0.5

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等。不符合的称为非牛顿流体，如接近凝固的石油、聚合物溶液、含有微粒杂质或纤维的液体（如泥浆）等。它们的差别可用图 0.5 表示。本教材仅讨论牛顿流体。

μ 的单位为牛顿·秒/米² ($N \cdot s/m^2$) 或帕斯卡·秒 ($Pa \cdot s$)，或称为“帕斯卡”，其单位

换算关系为

$$1 \text{ “帕斯卡”} = 0.1 \text{ 牛顿} \cdot \text{秒} / \text{米}^2$$

动力黏度的量纲为

$$[\mu] = [ML^{-1}T^{-1}]$$

液体的黏性还可以用 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 来表示， ν 称为运动黏性系数或运动黏度。其单位是米²/秒 (m^2/s)，过去习惯上把 1 厘米²/秒 (cm^2/s) 称为 1 “斯托克斯”，其换算关系为

$$1 \text{ “斯托克斯”} = 0.0001 m^2/s$$

运动黏度的量纲为

$$[\nu] = [L^2 T^{-1}]$$



水的运动黏性系数 ν 可用下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (0-9)$$

式中： t 为水温，以 $^{\circ}\text{C}$ 计； ν 以 cm^2/s 计。为了使用方便，在表 0.3 中列出不同温度时水的 ν 值。

任何实际液体都具有黏性，因此液体在流动过程中，就必须克服黏性阻力做功损失能量。故黏性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

在水力计算中，有时为了简化分析，对液体的黏性暂不考虑，而引出没有黏性的理想液体模型。在理想液体模型中，黏性系数 $\mu=0$ 。由理想液体模型分析所得的结论，必须对没有考虑黏性而引起的偏差进行修正。

表 0.3 不同水温时的 ν 值

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	0	2	4	6	8	10	12
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	14	16	18	20	22	24	26
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01176	0.0118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	28	30	35	40	45	50	60
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

4. 压缩性和膨胀性

压强增高时，分子间的距离减小，液体宏观体积减小，这种性质称为压缩性，也称弹性。温度升高，液体宏观体积增大，这种性质称为膨胀性。

液体的压缩性大小可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来量度。设压缩前的体积为 V ，压强增加 Δp 后，体积减小 ΔV ，体应变为 $\frac{\Delta V}{V}$ ，则体积压缩系数

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (0-10)$$

当 Δp 为正时， ΔV 必为负值，故上式右端加一负号，保持 β 为正数。 β 的单位为 $\text{m}^2/\text{牛顿}$ (m^2/N)。

体积弹性系数 K 是体积压缩系数 β 的倒数，即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (0-11)$$

其单位为 $\text{牛顿}/\text{米}^2$ (N/m^2)。

液体种类不同，其 β 或 K 值不同。同一液体， β 或 K 随温度和压强而变化，但变化不大。因此，液体并不完全符合弹性体的虎克定律。

在一般工程设计中，水的体积弹性系数 K 可近似地取为 $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。此值说明，若 Δp 为一个大气压， $\frac{\Delta V}{V}$ 约为 $1/20000$ ，因此，在 Δp 不大的条件下，水的压缩性可以忽略，相应地水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道水击问题时，则要考虑水的压缩性。

至于气体，它的压缩性和膨胀性要比液体大。但是在一定的条件下，如在距离不太长



的输气系统中，若各点气体流速远小于音速，则气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略，也就是说，这时的气体也可视为不可压缩的。

总之，在可以忽略液体或气体压缩性时，引出“不可压缩液（流）体模型”，可使分析简化。

水力学一般不考虑水的膨胀性。

5. 表面张力系数

表面张力是指液体表面在分子作用半径内的一薄层分子，由于引力大于斥力在液体表层沿表面方向产生的拉力。表面张力的大小可用表面张力系数 σ 来量度。 σ 是液体表面上单位长度上所受的拉力，单位为牛顿/米 (N/m)。

σ 值随液体种类和温度而变化，对 20℃ 的水， $\sigma=0.074\text{N/m}$ ，对水银为 0.54N/m 。

液体的表面张力很小，在水力学计算中一般不考虑它的影响。但在某些情况下，它的影响也是不可忽略的，如微小液滴（如雨滴）的运动，水深很小的明渠水流和堰流等。

在水力学实验中，经常使用盛水或水银的细玻璃管做测压管，由于表层液体分子与固壁分子的相互作用会发生毛细现象，如图 0.6 所示。

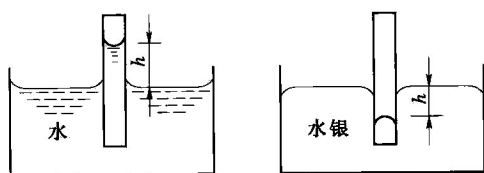


图 0.6

对 20℃ 的水，玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为

$$h = \frac{29.8}{d} \text{ (mm)}$$

对水银，玻璃管中汞面低于容器汞面的高度 h 约为

$$h = \frac{10.5}{d} \text{ (mm)}$$

上面二式中： d 为玻璃管的内径，mm，由于毛细管现象的影响，使测压管读数产生误差； h 称为毛细影响高度。因此，通常测压管的直径不小于 1cm。

由上两式可见，管径越细，差值越大，因此量测压强的细管内径 d 不宜过小。

上面讨论了液体的 5 个主要物理力学性质，它们都不同程度地影响着液体的运动，其中惯性、重力作用、黏性对水流运动起着主要作用，压缩性、膨胀性、表面张力特性只对某些特殊的水流运动产生影响。

情境 0.3 作用于液体上的力

液体的机械运动是由外力作用引起的，外力是液体机械运动的外因，液体的物理力学特性是其内因。作用在液体上的力，按其物理性质分，有重力、摩擦力、惯性力、弹性力、表面张力等。但在水力学中分析液体运动时，主要是从液体中分出一封闭表面所包围的液体，作为隔离体来分析。从这一角度出发，可将作用在液体上的力分为表面力和质量力两大类。

1. 表面力

作用在液体表面上的力称为表面力，是相邻液体或与其他物体壁面相互作用的结果。



根据连续介质的概念，表面力连续分布在隔离体表面上，因此，在分析时常采用应力的概念。与作用面正交的应力称为压应力或压强；与作用面平行的应力称为切应力。

其中压强 p 垂直于作用面

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (0-12)$$

切应力平行作用面

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (0-13)$$

顺便指出，在静止液体中，液体间没有相对运动，即 $\frac{du}{dy} = 0$ ，或者在理想液体中， $\mu = 0$ ，则 $\tau = 0$ ，则作用在 ΔA 上的力就只有法向力 ΔP 。

在国际单位制中， ΔP 及 ΔT 的单位是牛顿 (N)，简称牛。 p 及 τ 的单位是牛/米² (N/m²)，或称为帕斯卡 (Pa)，简称帕。其量纲为 $[p] = [\tau] = [ML^{-1}T^{-2}]$ 。

2. 质量力

质量力是指作用在隔离体内每个液体质点上的力，其大小与液体的质量成正比。最常见的是重力；此外，对于非惯性坐标系，质量力还包括惯性力。

质量力常用单位质量力来量度。若隔离体中的液体是均质的，其质量为 M ，总质量力为 F ，则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{M} \quad (0-14)$$

总质量力在坐标上的投影分别为 F_x ， F_y ， F_z ，则单位质量力在相应坐标的投影为 X 、 Y 、 Z 。

$$X = \frac{F_x}{M}$$

$$Y = \frac{F_y}{M}$$

$$Z = \frac{F_z}{M}$$

即

$$\vec{f} = X \vec{i} + Y \vec{j} + Z \vec{k}$$

单位质量力具有加速度的单位：m/s²；单位质量力的量纲： $[f] = [LT^{-2}]$ 。

3. 连续介质模型

自然界的物质具有三态：固体、液体和气体。

固体：具有一定的体积和一定的形状，表现为不易压缩和不易流动。

液体：具有一定的体积而无一定形状，表现为不易压缩和易流动。

气体：既无一定体积，又无一定形状，表现为易压缩和易流动。

液体和气体都具有易流动性，故统称流体。流体分子间距较大，内聚力很小，易变形（流动），只要有极小的外力（包括自重）作用，就会发生连续变形，即流体几乎没有抵抗变形的能力。所谓液体的连续介质假定，就是认为液体是由许多微团——质点组成（每个质点包含无穷多个液体分子），这些质点之间没有间隙，也没有微观运动，连续分布在液体所占据的空间。即认为液体是一种无间隙地充满所在空间的连续介质。



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。然而液体分之间的空隙非常之小，例如相邻水分子的间距约为 $3.1 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ， 1 cm^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（或称连续介质假说）。连续介质模型是欧拉于 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。

技能训练题

- 0.1 “液体在静止状态下不存在黏滞性”这种说法对吗，为什么？
- 0.2 引入连续介质假说和理想液体的概念有何实际意义？
- 0.3 水的重度 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$ ，黏性系数 $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ，求其运动黏性系数 ν 。空气的重度 $\gamma = 11.5 \text{ N/m}^3$ ， $\nu = 0.157 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，求其黏性系数。
- 0.4 容积为 4 m^3 的水，温度不变，当压强增加 $4.905 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时，容积减少 1000 cm^3 ，求水的体积压缩系数 β 和体积弹性系数 K 。
- 0.5 已知液体的密度为 997.0 kg/m^3 ，黏性系数 $\mu = 8.9 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，问其容重和运动黏性系数各为多少？