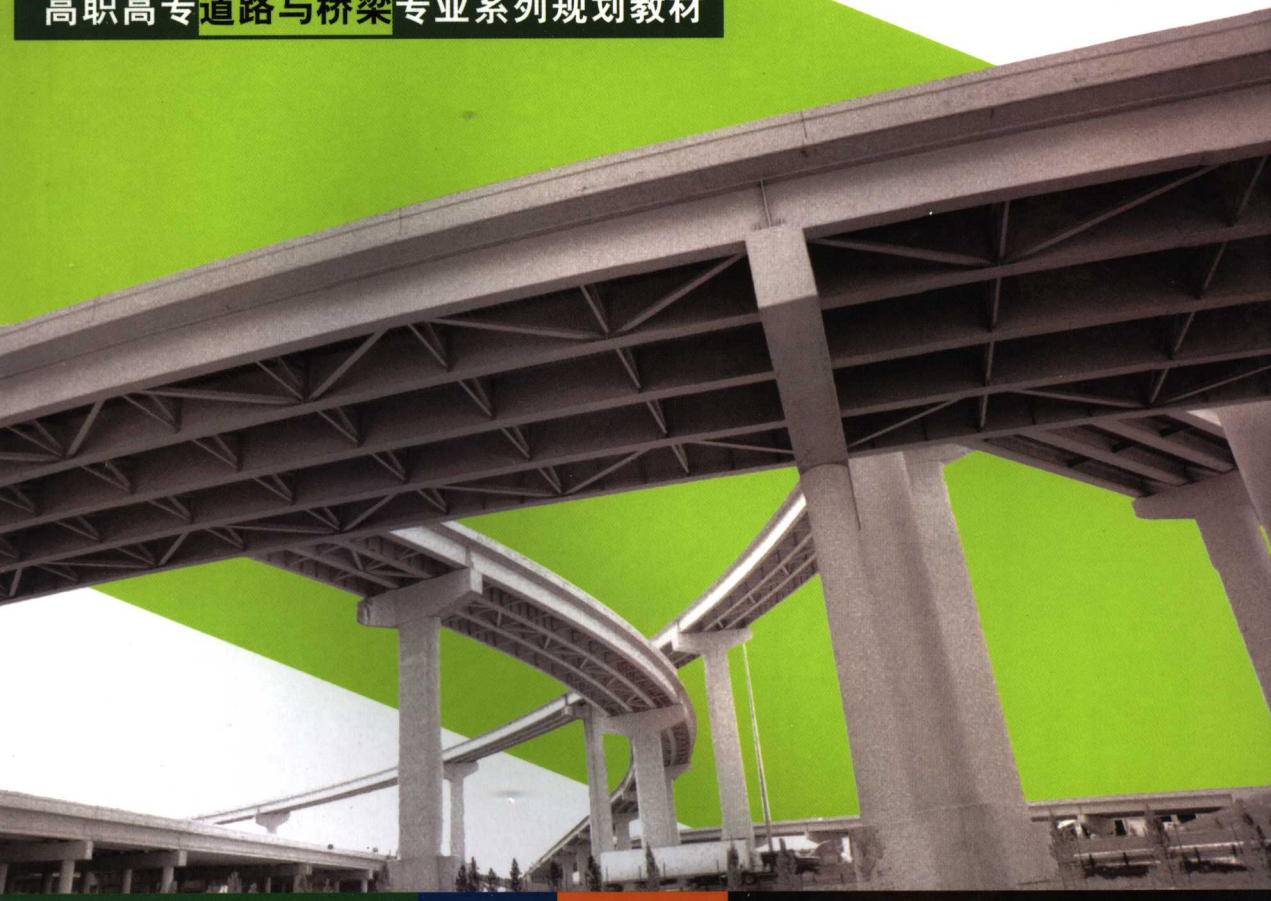


高职高专道路与桥梁专业系列规划教材



# 水力学与桥涵水文

邓爱华 张宇华 主 编  
武晓刚 施晓春 程银才 副主编



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

高职高专道路与桥梁专业系列规划教材

# 水力学与桥涵水文

邓爱华 张宇华 主编

武晓刚 施晓春 程银才 副主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书作为高职高专道路与桥梁专业系列规划教材中的主要专业基础课程,本着“理论够用为度”的原则,按照专业基本要求的50学时编写。本书主要介绍与桥涵工程相关的水力学和水文学基础知识、基本计算及工程应用。本书共分九章,分别为水力学基础知识、水静力学、水动力学基础、流动形态与水头损失、工程中常见的流动现象、河川水文基础知识、水文统计基本方法、桥涵设计流量及设计水位推算和路桥勘测设计中的水文水力计算问题。

本书可作为高职高专及成人教育道路与桥梁专业教材,也可供其他土木类专业教师及工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学与桥涵水文/邓爱华、张宇华主编. —北京:科学出版社,2007  
(高职高专道路与桥梁专业系列规划教材)

ISBN 978-7-03-018596-9

I. 水… II. ①邓… ②张… III. ①水力学-高等学校;技术学校-教材  
②道路工程-高等学校;技术学校-教材 IV. U513

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第020818号

责任编辑:彭明兰 张雪梅 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

世界知识印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年2月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—3 000 字数:348 000

定价:23.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈世知〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62132124 (VA03)

# 前 言

众所周知，高等职业教育的教育模式是“以岗位能力培养为主线，基础理论够用为度，着重专业技能的训练”。《水力学与桥涵水文》作为道路与桥梁工程专业的主要专业基础课程，更注重专业基础理论的工程应用，主要包括与桥涵工程相关的水力学和水文学基础知识、计算方法及工程应用。

基于这一根本指导思想，本教材的编写遵循以下原则：

1. 与教学大纲要求及教学方法的改革高度统一；
2. 突出职业技能和创新能力的培养；
3. 符合认识规律，注重知识更新；
4. 文字精炼，通顺易懂，篇幅适当；
5. 具有通用性，适合多种办学形式，并便于自学。

按课程教学基本要求，本教材在结构上突出“职业性、实用性、适用性”特色，改变了原有教材以“学科体系”为准的编排结构，在教材风格上形成“实践—理论—实践”的鲜明特色，与以往教材相比，本教材内容有增有减，体现以能力培养为中心，理论知识和技能操作并重；理论知识本着以“够用为度”的原则，适当删减，降低难度，大幅度增加实践应用知识和操作技能的训导，着重和突出工程能力、创新能力、应变能力和职业道德培养；内容编排具有思想性、系统性和启发性，符合初学者的认识规律，有利于教师讲解、学生自学；叙述从感性认识或实际例子入手，先提出问题，再去寻找解决问题的方法，即上升到理论知识，最后由理论解决实际问题。本书尽量避免采用枯燥死板的固定叙述模式，以增加知识的实用性来提高学生的学习兴趣；叙述语言尽量增加生动性和趣味性，注意用生活实例或比拟手法，以浅显易懂的语言解释较深奥的定理定律，避免了由于前面基础课知识的欠缺造成的困难。实例和习题的选材特别注意专业与实际相结合。

本教材共分为九章，平顶山工学院市政工程系武晓刚编写了第1、2章，深圳职业技术学院邓爱华编写了第3、4章，第5章由宁波高等专科学校施晓春编写，第6、7章由山东农业大学水利土木工程学院程银才编写，第8、9章由黄河水利职业技术学院张宇华老师编写。全书由邓爱华统稿。

限于作者水平，书中难免存在欠妥之处，敬请广大读者批评指正。

# 目 录

## 前言

<b>第一章 水力学基础知识</b> .....	1
1.1 水力学的任务与研究对象 .....	1
1.2 液体及其基本特征 .....	1
1.3 液体的主要物理力学性质 .....	2
1.4 作用于液体上的力.....	11
1.4.1 质量力 .....	11
1.4.2 表面力 .....	12
1.5 液体的力学模型.....	12
思考题 .....	13
习题 .....	14
<b>第二章 水静力学</b> .....	15
2.1 静水压强及其特性.....	15
2.1.1 静水压强概念 .....	15
2.1.2 静水压强特性 .....	16
2.2 重力作用下的静水压强分布.....	18
2.2.1 静水力学基本方程 .....	19
2.2.2 压强表示及测量 .....	22
2.2.3 水静力学基本方程式意义.....	26
2.2.4 液体静水压强分布图 .....	28
2.3 平面上的液体总压力计算.....	29
2.3.1 解析法 .....	30
2.3.2 图解法 .....	32
2.4 曲线上的液体总压力计算.....	34
2.4.1 计算原则.....	35
2.4.2 总压力的水平分力 .....	35
2.4.3 总压力的垂直分力 .....	35
2.4.4 总压力 .....	36
思考题 .....	38
习题 .....	39

<b>第三章 水动力学基础</b> .....	43
3.1 液体运动的描述方法 .....	43
3.1.1 拉格朗日法 .....	43
3.1.2 欧拉法 .....	43
3.2 流场基本概念 .....	44
3.2.1 流动基本概念 .....	44
3.2.2 流动类型 .....	46
3.3 恒定流连续性方程 .....	47
3.3.1 恒定总流连续性方程一般表达式 .....	48
3.3.2 有流量汇入或流出的恒定总流连续性方程 .....	49
3.4 恒定流能量方程——伯努利方程 .....	49
3.4.1 动水压强及特性 .....	50
3.4.2 理想液体的能量方程 .....	50
3.4.3 实际液体恒定元流的能量方程 .....	52
3.4.4 实际液体恒定总流的能量方程 .....	53
3.4.5 能量方程的几何图示——水头线 .....	54
3.4.6 能量方程的应用条件及注意事项 .....	55
3.4.7 有机械能输入（或输出）的能量方程 .....	58
3.4.8 能量方程在流速和流量测量中的应用 .....	59
3.5 实际液体恒定总流的动量方程 .....	60
3.5.1 动量方程 .....	61
3.5.2 应用动量方程的注意事项 .....	63
3.5.3 动量方程的应用 .....	64
思考题 .....	66
习题 .....	67
<b>第四章 流动形态与水头损失</b> .....	72
4.1 流动阻力与水头损失 .....	72
4.1.1 沿程阻力与沿程水头损失 .....	73
4.1.2 局部阻力与局部水头损失 .....	73
4.2 两种流动型态——层流与紊流 .....	74
4.2.1 雷诺实验 .....	74
4.2.2 流态判别——雷诺数 .....	75
4.2.3 流态与水头损失的关系 .....	77
4.3 均匀流沿程损失 .....	78
4.3.1 沿程损失与切应力的关系 .....	78
4.3.2 沿程损失通用公式 .....	79

4.4	圆管层流的沿程损失	79
4.4.1	断面流速分布特征	80
4.4.2	沿程损失与沿程阻力系数	81
4.5	紊流流动特征	82
4.5.1	紊流的形成过程	82
4.5.2	紊流基本特征	84
4.5.3	紊流切应力	84
4.5.4	层流底层与紊流流核	85
4.5.5	水力光滑壁面与水力粗糙壁面	85
4.5.6	紊流的流速分布	86
4.6	紊流的沿程损失	86
4.6.1	尼古拉兹实验	86
4.6.2	管流的沿程损失	88
4.6.3	明渠流沿程损失	94
4.7	流动的局部水头损失	96
4.7.1	流道局部突变类型	96
4.7.2	局部损失系数	99
4.7.3	常用流道局部损失系数	101
4.8	绕流阻力与升力简介	102
4.8.1	绕流阻力	102
4.8.2	绕流升力	103
	思考题	103
	习题	104
<b>第五章</b>	<b>工程中常见的流动现象</b>	<b>107</b>
5.1	孔口出流	107
5.2	管嘴出流	108
5.3	有压管流	109
5.3.1	简单管道	109
5.3.2	串联管道	110
5.3.3	并联管道	110
5.4	明渠均匀流	111
5.4.1	明渠均匀流的形成条件和水力特征	111
5.4.2	明渠均匀流的水力计算	112
5.4.3	水力最优断面	112
5.5	堰流与闸孔出流	113
5.5.1	堰流	113

5.5.2 闸孔出流 .....	113
5.6 渗流 .....	114
习题 .....	116
<b>第六章 河川水文基础知识</b> .....	<b>118</b>
6.1 概述 .....	118
6.1.1 水文学 .....	118
6.1.2 水文现象的基本特性 .....	118
6.1.3 水资源 .....	119
6.1.4 工程水文学及其任务 .....	121
6.1.5 水文学的研究方法 .....	122
6.2 自然界的水循环 .....	124
6.2.1 水循环 .....	124
6.2.2 地球上的水量平衡 .....	125
6.2.3 降水 .....	127
6.2.4 蒸发 .....	136
6.2.5 下渗 .....	139
6.3 河流、流域与水系 .....	140
6.3.1 河流及其特征 .....	140
6.3.2 流域及其特征 .....	142
6.4 河川径流 .....	144
6.4.1 河川径流的形成 .....	144
6.4.2 径流量的表示方法和度量单位 .....	147
6.4.3 我国河川径流分布概况 .....	148
6.5 泥沙运动与河床演变 .....	150
6.5.1 泥沙运动 .....	150
6.5.2 河床演变 .....	153
6.6 水文测验与资料整编 .....	154
6.6.1 水文测站与站网 .....	154
6.6.2 水位观测 .....	155
6.6.3 流量测验 .....	157
6.7 水文调查与水文资料搜集 .....	162
6.7.1 洪水调查 .....	163
6.7.2 暴雨调查 .....	164
6.7.3 枯水调查 .....	164
6.7.4 水文资料的搜集 .....	164
思考题 .....	165



<b>第七章 水文统计基本方法</b> .....	167
7.1 水文统计的基本概念 .....	167
7.1.1 随机现象及其统计规律 .....	167
7.1.2 水文统计基本术语 .....	168
7.1.3 水文样本的基本要求 .....	169
7.2 频率与概率 .....	170
7.2.1 频率 .....	170
7.2.2 概率 .....	170
7.2.3 概率与频率的关系 .....	171
7.2.4 累积频率 .....	172
7.2.5 概率的计算 .....	172
7.3 随机变量的频率分布 .....	173
7.4 经验频率曲线 .....	176
7.4.1 经验频率的计算公式 .....	176
7.4.2 经验频率曲线的绘制 .....	177
7.4.3 经验频率曲线存在的问题 .....	178
7.4.4 经验频率与重现期的关系 .....	179
7.5 理论频率曲线 .....	179
7.5.1 P-Ⅲ型分布曲线.....	180
7.5.2 统计参数 .....	181
7.5.3 统计参数对理论频率曲线形状的影响 .....	183
7.6 水文频率计算的方法 .....	184
7.6.1 水文频率计算的一般问题 .....	185
7.6.2 水文频率计算的方法——配线法（适线法） .....	185
7.6.3 频率计算在工程水文中的应用 .....	186
7.7 相关分析 .....	189
7.7.1 相关关系的概念 .....	189
7.7.2 相关的种类 .....	190
7.7.3 简单直线相关 .....	190
思考题.....	194
<b>第八章 桥涵设计流量及设计水位的推算</b> .....	195
8.1 洪水与设计洪水 .....	195
8.1.1 洪水 .....	195
8.1.2 设计洪水 .....	196
8.1.3 设计流量及设计洪水位 .....	196
8.1.4 设计流量及设计洪水位的推算方法.....	197

8.2	用实测流量资料推算设计流量 .....	197
8.2.1	资料审查 .....	198
8.2.2	洪水资料的延长插补 .....	198
8.2.3	设计流量的计算方法 .....	199
8.3	由洪水调查资料推算设计流量 .....	200
8.3.1	由历史洪水调查资料和少量实测资料推算设计流量 .....	200
8.3.2	经验公式法确定设计流量 .....	201
8.4	小流域暴雨洪峰流量的推算 .....	202
8.4.1	推理公式 .....	203
8.4.2	经验公式 .....	210
8.4.3	桥位断面设计流量与设计洪水位的推算 .....	212
	习题 .....	213
<b>第九章</b>	<b>路桥勘测设计中的水文水力计算问题</b> .....	<b>214</b>
9.1	概述 .....	214
9.2	大中桥桥位布置与长度计算 .....	214
9.2.1	桥位选择 .....	215
9.2.2	桥位勘测 .....	216
9.2.3	桥孔布置 .....	218
9.2.4	桥孔长度的计算 .....	222
9.2.5	桥面标高的计算 .....	227
9.3	梁墩台冲刷计算简介 .....	232
9.3.1	桥下一般冲刷深度 $h_p$ 的计算 .....	233
9.3.2	桥墩局部冲刷 .....	237
9.3.3	桥梁墩台基础最小埋置深度 .....	242
9.3.4	调治构造物 .....	242
9.4	公路小桥涵的勘测设计 .....	245
9.4.1	小桥涵的设计原则与基本要求 .....	246
9.4.2	小桥涵水力计算 .....	247
9.4.3	涵洞孔径计算 .....	253
9.4.4	确定小桥涵孔径的经验方法 .....	255
	习题 .....	256
	<b>附录</b> .....	<b>258</b>
	<b>参考文献</b> .....	<b>265</b>

# 第一章 水力学基础知识

水是人类生存和社会经济发展不可缺少的物质和资源,对工农业生产、城市建设与生活起着主要作用。要正确合理地利用水资源就必须首先认识水的基本特性和运动规律。本章在简单介绍水力学的任务、研究对象及液体概念基础上,主要介绍液体的基本特征、物理力学性质、液体运动时作用在液体上的力以及研究液体运动规律时常用的三个力学模型。

## 1.1 水力学的任务与研究对象

水力学是研究液体在平衡和运动状态的力学规律及其在工程中应用的科学,是力学的一个分支。它的研究对象是以水为代表的所有液体。水力学的主要内容包括水静力学和水动力学两大部分,分别研究液体在静止状态时的平衡规律和在流动状态下的运动规律及能量转换规律。物理学和理论力学是学习水力学的必要基础。

在讨论液体的力学规律之前,必须首先明确液体概念和基本特征,并对决定液体平衡和运动规律的内部原因——液体的力学性质进行分析和讨论。

## 1.2 液体及其基本特征

**【实例 1.1】** 放在桌面上的一杯水或一碗牛奶具有一定的体积和形状,但当把它们倾倒在桌面上时,它们会立即向四周漫成一滩,一滴黏稠的油漆也会在平板上变得越来越扁平。

**【问题】** 为什么水或牛奶不能像固体那样具有固定不变的体积和形状?

自然界的物质有三种存在形态,即固态、液态和气态。固体分子之间距离很小,内聚力很大,所以它们能保持一定的形状和体积,能承受拉力、压力和剪切力。凡是在一般情况下不能像固体那样保持一定的形状,具有流动性的物质,统称为流体。上述实例说明:液体在任何一个微小的剪切力作用下,甚至仅在重力作用下就会发生连续不断地变形,我们就称流体的这种变形为流动。顾名思义,流体的最基本特征是具有流动性,这种流动性正是流体区别于固体的最基本的特性。

流动性使流体具有下列特点:

1) 流体没有固定的形状,它的形状是由约束它的边界形状所决定的。不同的边界必将产生不同的流动。因此,与流体接触的周围物体的形状和性质,也就是边

界条件,对流体的运动有着直接的影响。

2) 流体的运动又和流体的变形联系在一起。当流体运动时,其内部各质点之间有着复杂的相对运动,所以流体的运动又和它的物理力学性质有密切的关系。物理性质不同的流体,即使其边界条件相同也会产生不同的流动。

那么,流体为什么会表现出与固体完全不同的特性呢?

物质的宏观性质与分子结构及分子间的作用力有关。根据物质的分子构成理论,液体和固体一样,是由具有一定间隙的、运动着的无数分子所构成,但其分子间距比固体大得多,而分子间的相互吸引力却比固体小得多,可以说非常微弱。正因为这种分子结构上的差异,流体表现出与固体完全不同的宏观特征。

显然,流体包括液体和气体两大类。

气体分子之间间距很大,内聚力却很小,所以它们没有固定的形状和体积,即极易被压缩,也能任意扩散充满给定的整个空间。

而液体是介于固体和气体之间的物质存在形态。液体分子间的距离和内聚力也都介于固体和气体之间,所以液体不能保持固定的形状,但却能保持固定的体积;液体几乎不能承受拉力,极易发生变形,但能承受压力;液体可以压缩,但与气体相比不宜压缩,只有在较大的压力作用下,液体才会表现出及其微小的体积变化。

自然界中的各种液体虽然千变万化,各有不同,但是无论现象多么复杂,每个具体的流动,都是由液体本身的物理性质(这是内因)和流动所在的外界条件(这是外因)这两个因素所决定的。水力学中所要探讨的运动规律,实质上就是要研究液体的物理性质和流动的边界条件对液体运动所产生的作用和影响。

### 1.3 液体的主要物理力学性质

外因是变化的条件,内因是变化的依据,外因通过内因起作用。力是引起物体运动的原因。液体在外力作用下是处于平衡还是作机械运动,以及在此过程中所发生的一切现象和表现特征,都是由液体自身的物理力学性质决定的。因此要研究液体的运动,就必须首先对液体的物理力学性质有所了解,下面介绍液体的几个物理力学性质。

#### 1. 惯性

惯性就是物体维持原有状态的性质,运动状态的任何改变都必须施力。表达惯性的物理量是物体质量,质量越大,运动状态就越难改变,因而惯性也越大。当物体受其他物体的作用力而改变运动状态时,此物体反抗原有运动状态的改变而作用于其他物体上的反作用力称为惯性力。设物体的质量为  $m$ , 加速度为  $a$ , 则惯性力  $F$  表达为

$$F = -ma \quad (1.1)$$

式中： $F$ ——运动物体所受的惯性力，N；

$m$ ——物体质量，kg；

$a$ ——物体运动的加速度， $m/s^2$ 。

式中负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

液体惯性的大小与其质量密切相关，而质量又与其体积成正比。我们把单位体积内液体的质量定义为该种液体的密度，用  $\rho$  表示。液体的种类不同，密度也不同。各处密度都相同的液体称为均质液体，反之，则为非均质液体。

若某均质液体体积为  $V$ ，质量为  $m$ ，则其密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2)$$

对于非均质液体，可用高等数学中求极限的方法确定空间某点的密度。在该点周围取一微元体积  $\Delta V$ ，其质量为  $\Delta m$ ，则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1.3)$$

在国际单位制中，密度的单位  $kg/m^3$ 。

液体的密度不是一成不变的，它一般随温度和压强的变化而变化。相比而言，液体密度随温度和压强的变化甚微，而气体则较大。在绝大多数实际工程的液体力学问题中，可近似地认为液体的密度为常数。计算时，一般采用水的密度为  $1000kg/m^3$ 。

## 2. 万有引力特性

物体之间具有相互吸引的性质，这就是物理学中的万有引力特性，这个吸引力称为万有引力。在液体运动中，一般只考虑地球对液体的引力，即重力（又称重量），用  $G$  表示，有

$$G = mg \quad (1.4)$$

式中： $G$ ——液体体积  $V$  时的重量，N；

$m$ ——液体体积为  $V$  时的质量，mg；

$g$ ——当地重力加速度， $m/s^2$ ，工程计算中一般取  $9.8m/s^2$ 。

对均质液体，单位体积液体所具有的重量称为液体的容重或重度，用  $\gamma$  表示；对非均质液体，液体体积  $\Delta V$  中某一点  $A$  的容重  $\gamma_A$  可表示为

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.5)$$

在国际单位制中，容重的单位是  $N/m^3$ 。

一般情况下，液体容重随温度和压强变化甚微，故实用中通常取为常数。常温下水的容重为  $9800N/m^3$ ，而工程单位制中水的容重是  $1000kg/m^3$  或  $1t/m^3$ 。

根据式(1.2)和式(1.4)可知，均质液体的密度和容重之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1.6)$$

液体的密度随液体所受的压强和温度而变化,液体的变化比气体的小,特别是随压强不同而产生的变化更小。

压力为 0.1MPa(1 个大气压)、温度为 15℃时,淡水、海水、空气和汞的密度和容重分别为

$$\text{淡水: } \rho = 1000 \text{kg/m}^3, \quad \gamma = 9800 \text{N/m}^3$$

$$\text{海水: } \rho = 1020 \text{kg/m}^3, \quad \gamma = 9996 \text{N/m}^3$$

$$\text{空气: } \rho = 1.226 \text{kg/m}^3, \quad \gamma = 12 \text{N/m}^3$$

$$\text{汞(1 标准大气压, } 0^\circ\text{C): } \rho = 13\,595 \text{kg/m}^3, \quad \gamma = 133\,326 \text{N/m}^3$$

在其他温度下水的物理力学性质见表 1.1。

表 1.1 水的物理性质

温度 $t/^\circ\text{C}$	容重 $\gamma$ /(N/m <sup>3</sup> )	密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	黏度 $\mu$ /( $\times 10^{-3}$ Pa·s)	运动黏度 $\nu$ /( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s)	弹性系数 $E$ /( $\times 10^{-1}$ N/m <sup>3</sup> )	表面张力 $\sigma$ /(N/m)
0	9.805	999.8	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	9.73	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

### 3. 压缩性与膨胀性

#### (1) 液体的压缩性

如果温度不变,液体的体积随压强增加而缩小,这种特性称为液体的压缩性,通常用体积压缩系数  $\beta_P$  来表示。它指的是在温度不变时,压强增加一个单位所引起的液体体积相对缩小量,即

$$\beta_p = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (1.7)$$

式中,  $\beta_p$  的单位是压强单位的倒数, 即  $\text{Pa}^{-1}$ 。由于体积随压强的增大而减少, 所以  $\frac{dV}{V}$  和  $dP$  异号, 式中右侧加一负号, 以保证  $\beta_p$  为正值。显然,  $\beta_p$  越大, 说明液体越容易压缩。

工程中常常用液体的体积压缩系数的倒数, 即弹性模量  $E$  表示液体的压缩性。它指的是液体的单位体积相对变化量所需的压强增量, 即

$$E = \frac{1}{\beta_p} \quad (1.8)$$

通常可取水的  $E = 19\,613 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

## (2) 液体的膨胀性

如果压强不变, 液体的体积随温度增高而增大, 这种特性称为液体的膨胀性, 通常用体积膨胀系数  $\hat{\alpha}_t$  表示。它指的是在压强不变时, 温度增加一个单位所引起的液体体积相对增大量, 即

$$\hat{\alpha}_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1.9)$$

水的压缩性和膨胀性都很小。压强每升高 1at, 水的密度仅增加约 1/20 000; 在常温下 (20°C 左右), 温度每升高 1°C, 水的密度仅减少约 1.5/10 000。例如, 在 0.1MPa、温度为 10~20°C 时, 水的  $\hat{\alpha}_t$  值为  $1.5 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$ 。所以, 通常情况下, 水的压缩性和膨胀性可以忽略不计, 只有在某些特殊情况下, 如水管阀门突然关闭时发生水锤现象, 自然循环的热水采暖系统计算等问题, 才需要考虑水的压缩性和膨胀性。

## 4. 黏性

**【实例 1.2】** 静止时油和水在状态上没有什么区别, 但如果把瓶中的水和油倒出时, 会发现水比油流得更快; 而到了冬天, 油的流动更显得慢些; 在锅中加热的油显得易于流动; 用热水洗油碗比冷水更易洗干净。

**【问题】** 这些现象是液体的什么性质的表现? 它是怎样产生的? 又具有什么特性? 与哪些因素有关?

### (1) 黏性的表象

上述这些现象从感性上说明, 运动中的液体表现出一种阻挠其自身运动的性质, 而且这一性质不仅与液体的种类有关, 还与温度有关。下面请大家先看一个演示实验。

观察图 1.1 所示两块平行平板, 其间充满静止液体, 两平板间距离  $h$ , 以  $y$  方向为法线方向。保持下平板固定不动, 使上平板沿所在平面, 以速度  $u$  运动。于是粘附于上平板表面的一层液体, 随平板以速度  $u$  运动, 并一层一层地向下影响, 各

层相继运动,直至粘附于下平板的流层速度为零。在  $u$  和  $h$  都较小的情况下,各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

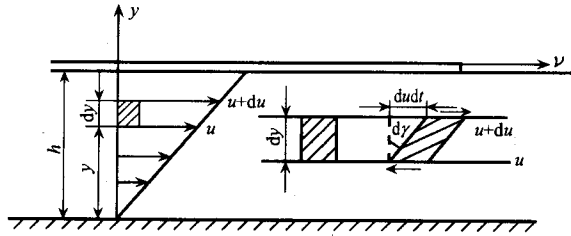


图 1.1 液体黏性实验示意图

上平板带动粘附在板上的流层运动,而且能影响到内部各流层运动,表明内部各流层之间,存在着切向力,即内摩擦力,这就是黏性的宏观表象。由此得出,黏性是液体的内摩擦特性。

### (2) 黏性的概念

从实验现象我们得出:静止时液体虽然不能承受剪切力,但在运动状态下,内部质点或流层间因相对运动而产生内摩擦力以抵抗剪切变形,我们称液体的这种性质为黏性,称内摩擦力为黏滞力。由此得出,黏性是液体的内摩擦特性。液体运动时产生黏性的原因,实际是液体内聚力(液体分子与分子间的吸引力)的存在和液体质点或流层间能量交换的结果,是液体分子间内聚力的一种表现形式,而静止状态的液体不表现出黏性。

液体和气体都具有黏性,只是相同条件下程度不同而已,通常情况下液体的黏性比气体大。这是因为液体的分子距远远小于气体的分子距,而分子间引力却较气体强得多。

### (3) 黏性的量度——牛顿内摩擦定律

黏性是液体最重要的一个物理力学性质,它为我们以后研究液体运动时产生能量损失提供了答案。

衡量液体黏性大小的物理量有两个,即动力黏度  $\mu$  和运动黏度  $\nu$ 。

动力黏度的概念是牛顿(Newton)在 1686 年,根据液体层状流动实验而首先提出来的,这就是为后人以大量的实验研究和理论分析所验证的液体内摩擦定律。他提出了“液体内部的剪切应力与垂直于液体运动方向的速度梯度成正比”的论断,其示意图如图 1.1 所示。

相距为  $h$  的上、下两平行平板之间充满均质黏性液体。两平板的面积均  $A$ ,其值足够大,以致可略去平板四周边界的影响。将下板固定不动,而以  $T$  拖动上板使其作平行于下板的匀速直线运动。实验发现:

1) 由于液体的黏性,与平板直接接触的液体质点将与平板一起移动而无滑移,因此与上板接触的液体质点速度为  $u$ ,而与下板接触的液体质点速度为零。测



量表明,两板之间的速度呈线性分布,即

$$u(y) = \frac{u}{h}y$$

2) 比值  $T/A$  与  $u/h$  成正比,即

$$\frac{T}{A} = \mu \frac{u}{h}$$

以后进一步的实验表明,当两板间具有其他(非直线)速度分布  $u(y)$  时,有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.10)$$

式中:  $T$ ——相邻两流层间的内摩擦力, N;

$A$ ——相邻两流层间的接触面积,  $m^2$ ;

$\tau$ ——相邻两流层间接触面上单位面积上的内摩擦力, Pa;

$\mu$ ——液体的动力黏度,常简称为黏度,与液体的性质、温度等有关,在国际单位制中,  $\mu$  的单位为  $Pa \cdot s$ ;

$\frac{du}{dy}$ ——流速沿垂直于速度方向(速度的法线方向)的变化率,称为流速梯度。

式(1.10)称为牛顿内摩擦定律。动力黏度  $\mu$  是对液体黏性大小的度量,它是与液体物理性质有关的物理常数,其单位可由式(1.10)直接导出。

在国际单位制(SI制)中

$$[\mu] = N \cdot s/m^2 = Pa \cdot s$$

在工程单位制中

$$[\mu] = kgf \cdot s/m^2$$

换算关系为

$$1Pa \cdot s = 0.101972kgf \cdot s/m^2$$

在研究液体的运动时,还常采用所谓运动黏度,其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.11)$$

式中:  $\rho$ ——液体的密度,  $kg/m^3$ 。

在国际单位制中,  $\nu$  的单位为  $m^2/s$ 。

把  $\nu$  称为运动黏度的原因是它的单位只包含运动学的量:长度  $[L]$  及时间  $[T]$ 。

(4) 黏性的影响因素

液体的动力黏度  $\mu$  一般随温度和压强的变化而改变,但实验证明,在低压情况下(通常指低于 100 at),压强变化对液体黏度的影响很小,一般可以忽略。因而温度是影响液体黏度的主要因素。

需要指出的是,液体与气体的黏性随温度变化的趋势是不同的。一般液体的  $\mu$  和  $\nu$  值随温度升高而减小,而气体的  $\mu$  和  $\nu$  值随温度升高而增大。液体和气体的黏