

13

高等职业技术学院 教材
高等专科学校

水 力 学

主编 刘纯义 张耀先



A1008141

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是为高等职业技术学校水利水电工程专业和水利工程专业编写的教材。全书共分十二章,包括绪论、水静力学、恒定流的基本原理、水流型态与水头损失、管流、明渠恒定均匀流、明渠恒定非均匀流、闸孔出流与堰流、泄水建筑物下游水流的衔接与消能、渗流、高速水流简介、水力模型试验基础。各章节有例题、习题和常用图表。

本书也适用于普通专科学校同类专业的教学,亦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/刘纯义,张耀先主编. —北京:中国水利水电出版社,2001.7

高等职业技术学院、高等专科学校教材

ISBN 7-5084-0664-8

I. 水… I. ①刘…②张… III. 水力学—高等学校:技术学校—教材
IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 032425 号

书 名	高等职业技术学院 教材 水力学 高等专科学校
作 者	主编 刘纯义 张耀先
出 版	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: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 409 千字
版 次	2001 年 8 月第一版 2001 年 8 月北京第一次印刷
印 数	0001—3200 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是根据教育部《关于加强高职、高专教育人才培养工作的意见》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》等文件精神，用中央财政安排的“支持示范性职业技术学院建设”项目经费组织编写的。本书适用于高等职业学校和高等专科学校的水利水电工程和水利工程两专业的水力学教学，也可作为水文水资源、水土保持等专业的教学用书。

本书在编写过程中，力求贯彻教学改革的精神，既重视基本理论，又不过分强调理论的系统性、完整性，充分考虑我国水利水电建设的需要，紧紧围绕本专业的培养目标，选取内容，合理安排，突出实用，尽可能体现高等职业教育的特点。

参加本书编写工作的有黄河水利职业技术学院刘纯义（第一、七章）、王俊、李小雄（第二、三章）、张耀先（第四章）、王勤香（第五章）、张宇华（第八、九章）、罗全胜（第十、十一），黑龙江水利专科学校谭志伟（第六、十二章）。全书由刘纯义、张耀先主编，刘纯义统稿。

本书由清华大学水利水电工程系张红武教授及长沙电力学院丁新求同志主审，对全书提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，对高等职业技术教育的经验不足，本书中的缺点和错误在所难免，诚恳读者予以批评指正。

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 水力学的研究对象和任务	1
第二节 液体的基本特性和主要物理力学性质	1
第三节 作用于液体上的力	6
第四节 水力学的研究方法	7
习题	8
第二章 水静力学	10
第一节 静水压强及其特性	10
第二节 重力作用下的液体平衡	13
第三节 静水压强的量测	15
第四节 作用在平面上的静水总压力	18
第五节 作用在曲面上的静水总压力	23
第六节 重力和惯性力共同作用下的液体平衡	26
习题	30
第三章 恒定流的基本原理	34
第一节 描述液体运动的方法	34
第二节 液体运动的一些基本概念	37
第三节 均匀流和非均匀流、渐变流和急变流	40
第四节 恒定总流的连续性方程	42
第五节 恒定总流的能量方程	43
第六节 能量方程应用举例	49
第七节 恒定总流的动量方程	54
习题	58
第四章 水流型态与水头损失	62
第一节 水头损失及其分类	62
第二节 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	63
第三节 液体流动的两种型态	65
第四节 紊流运动	67
第五节 沿程水头损失的分析与计算	73
第六节 边界层概念及边界层的分离现象	80
习题	88
第五章 管流	90
第一节 概述	90
第二节 简单管道的水力计算	91
第三节 虹吸管及水泵装置的水力计算	100

第四节	复杂管道的水力计算	104
第五节	管网水力计算	109
第六节	压力管道中的水击问题	114
习题		119
第六章	明渠恒定均匀流	123
第一节	概述	123
第二节	明渠均匀流的特性及计算公式	125
第三节	明渠均匀流的水力计算	128
第四节	明渠均匀流计算中的几个问题	131
习题		134
第七章	明渠恒定非均匀流	136
第一节	明渠水流的三种流态及其判别	136
第二节	缓流、急流的转换现象——水跌与水跃	143
第三节	明渠恒定非均匀渐变流基本方程	152
第四节	棱柱体渠道恒定非均匀渐变流水面线分析	154
第五节	明渠恒定非均匀渐变流水面线计算	159
第六节	弯道水流简介	167
习题		169
第八章	闸孔出流和堰流	173
第一节	概述	173
第二节	闸孔出流	174
第三节	堰流	180
第四节	无压隧洞的水力计算	193
习题		197
第九章	泄水建筑物下游水流的衔接与消能	200
第一节	概述	200
第二节	底流式衔接与消能	201
第三节	挑流式衔接与消能	212
习题		219
第十章	渗流	221
第一节	概述	221
第二节	达西定律	223
第三节	地下河槽中的恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	226
第四节	井、截渗沟和渠道的渗流计算	231
第五节	平面渗流的图解法	236
第六节	用水电比拟法绘制流网	240
习题		242
第十一章	高速水流简介	244
第一节	高速水流的脉动压强	244
第二节	水工建筑物的气蚀问题	246
第三节	明渠高速掺气水流	249

第四节 明渠急流的冲击坡和滚坡	252
习题	253
第十二章 水力模型试验基础	254
第一节 概述	254
第二节 相似的基本原理	255
第三节 各种力作用下的相似准则	257
习题	263
附录	264
参考文献	268

第一章 绪 论

第一节 水力学的研究对象和任务

水力学是力学的一个分支，它是研究以水为主的液体的平衡和机械运动规律及其在生产实际中应用的一门科学。因其研究的主要对象是水，故称之为水力学。

水力学在水利水电工程的勘测、规划、设计、施工和运用管理中有比较广泛的应用。例如，为了满足防洪、供水、发电的要求，通常需要在河道上筑坝形成水库，用来调节洪水和储蓄水量。水库蓄水之后，抬高了上游水位，要估算库区的淹没范围和淹没损失，需要推算上游的水面线；验算坝体是否稳定，需要计算坝体承受的水压力；有一小部分水在水压力的作用下会经坝体、坝基和两岸向下游渗流，渗流是否会造成过多的水量损失，能否对坝体、坝基产生破坏作用，需要进行渗流计算；从水库向下游宣泄洪水、供水和引水发电，需要修建溢洪道、泄洪洞及引水洞等泄水建筑物，泄水建筑物需要多大的孔口尺寸才能满足通过设计流量的要求，从泄水建筑物下泄的高速水流，采用怎样的措施才能消除多余的动能，避免对水工建筑物及河道的冲刷等，这些都属于水力学应解答的问题。

归纳起来，在水利水电工程中经常遇到的水力学问题主要有五个方面：一是水工建筑物及河渠的过水能力问题；二是水对水工建筑物的作用力问题；三是水流的流态及泄水建筑物下游水流的消能问题；四是河渠水面线问题；五是渗流问题。

需要指出的是，上述五个方面的问题并不是水力学的全部问题，它们之间也不是孤立的、截然分开的，而是水流与边界的相互作用从不同角度的反映，在分析研究时需要综合考虑。

水力学的研究方法和基本理论不仅适用于水，也适用于各种常见液体和可忽略压缩性影响的气体。因此，水力学不仅在水利水电建设方面有重要的用途，并且在城市建设、环境保护、船舶设计、机械制造、石油开采、化学工业、医学等有液体流动问题的各方面，都具有一定的参考价值。

第二节 液体的基本特性和主要物理力学性质

一、液体的基本特性

自然界的物质一般有三种形态，即固体、液体和气体。液体的基本特性主要是从力学的角度，研究液体与固体、气体的区别。固体由于分子间的距离很小，内聚力很大，所以它能够保持固定的形状和体积，能够承受一定大小的拉力、压力和剪切力。与固体相比，液体分子间的距离较大，内聚力较小，它只能保持一定的体积，没有固定的形状。液体几乎不能承受拉力抵抗拉伸变形，在静止状态下也不能承受剪切力，极易发生剪切变形或流动，但液体与固体一样能够承受压力。气体分子之间的距离很大，几乎不存在内聚力，分子可以自由运动，因此气体不仅没有固定的体积，也没有固定的形状，它可以任意扩散充满其所占据的有限空间，所以气体极易膨胀和压缩。液体与气体相比，液体的压缩性很小，但

它们都具有易流动性，所以液体、气体又统称为流体。

液体是由分子组成的。从微观角度看，液体分子之间具有空隙，并且在进行着复杂的微观运动，是不连续、不均匀的。由于水力学研究的是液流的宏观机械运动，并不关心液体分子的微观运动，所以在水力学中引入了液体具有连续性的假定，即认为液体是由无数液体质点所组成的中间没有空隙存在的连续介质。这样就可以运用数学中的连续函数来分析水力学问题。实践证明，这一假定对研究的问题有足够的精确性。所谓液体质点，它是由许多分子组成的、无微观运动、体积很小可以忽略不计的小水团，它是水力学研究的液体的最小单位。另外，在水力学研究中一般还认为液体具有均匀等向性，即认为液体的各个部分和各个方向的物理性质是一样的。

总之，在水力学研究中的液体是：容易流动、不易压缩、均匀等向的连续介质。

二、液体的主要物理力学性质

液体受外力作用做机械运动与自身的物理性质有关，研究液体的机械运动应首先了解液体的物理性质。液体的物理性质是多方面的，下面我们着重讨论与液体运动有关的几种主要物理力学性质。

（一）惯性

物体所具有的反抗改变原有运动状态的物理性质叫惯性。液体与其它物体一样也具有惯性。惯性用质量度量，质量愈大，惯性愈大。当物体受其它物体的作用而改变运动状态时，物体反抗改变原有运动状态而作用于其它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 ，则惯性力为

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

式中负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

按照国际单位制的规定，质量的单位用千克 (kg)；长度的单位用米 (m)；时间的单位用秒 (s)；力的单位为牛顿 (N) 或千牛顿 (kN)。

单位体积的液体所具有的质量称为密度，以符号 ρ 表示。体积为 V ，质量为 m 的均质液体，则

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

在国际单位制中，密度的单位是千克/米³ (kg/m³)。

同一种液体的密度随压强和温度而变化，但变化甚微，一般情况下可视为常数。在水力计算时，通常把一个标准大气压下，温度为 4℃ 时水的最大密度值 $\rho = 1000$ 千克/米³ (kg/m³) 作为计算值。

（二）万有引力特性

物体之间相互具有吸引力的性质，称为万有引力特性。地球与物体之间的引力称为重力，也叫物体的重量，用符号 G 表示。研究液体的运动一般只考虑地球对液体的引力。设物体的质量为 m ，重力加速度为 g ，则重力

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

重力 G 的单位为牛顿 (N) 或千牛顿 (kN)。

单位体积的液体所具有的重量称为容重，也叫重度或重率，用符号 γ 表示。对于体积

为 V ，重量为 G 的均质液体，其容重为

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

将 $G=mg$ 代入上式，可得

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-5)$$

或

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-6)$$

采用国际单位制，容重的单位为牛顿/米³ (N/m³) 或千牛顿/米³ (kN/m³)。

同一种液体的容重随温度和压强的变化而变化，但变化很小，水力计算中也常以一个标准大气压下 4℃ 时水的容重 $\gamma=9800$ 牛顿/米³ (N/m³) 作为计算值。水在不同温度时的容重值见表 1-1，几种常见液体的容重值见表 1-2。

表 1-1 不同温度时水的容重 γ 值 (标准大气压)

温度 (°C)	0	4	10	20	30	40	60	80	100
容重 (N/m ³)	9798.73	9800.00	9797.55	9782.95	9758.45	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77

表 1-2 几种常见液体的容重 γ 值 (标准大气压)

液体名称	汽油	纯酒精	蒸馏水	海水	水银
温度 (°C)	15	15	4	15	0
容重 (N/m ³)	6664~7350	7778.3	9800	9996~10084	133280

(三) 粘滞性

液体在静止状态下不能够承受剪切力抵抗剪切变形，但是当液体质点之间发生相对运动时，液体内部能够产生内摩擦力抵抗剪切变形，这种性质称为液体的粘滞性。液体间的内摩擦力又称为粘滞力。

如图 1-1 (a) 所示，液体沿固体表面作平行直线流动，设流动方向为 x ，垂流动方向为 y ，并且认为水流分层流动，各层液体质点在流动过程中互不混掺（这种流动称为层流，见第四章）。因为液体具有粘滞性，紧靠固体表面的液体质点与固体表面无相对运动，速度为零，沿 y 方向流速逐渐增大。若距固体边界为 y 的流层的流速为 u ，在相邻流层 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$ ，由于两流层的速度不同，则液体质点必然存在相对运动，在两流层之间就

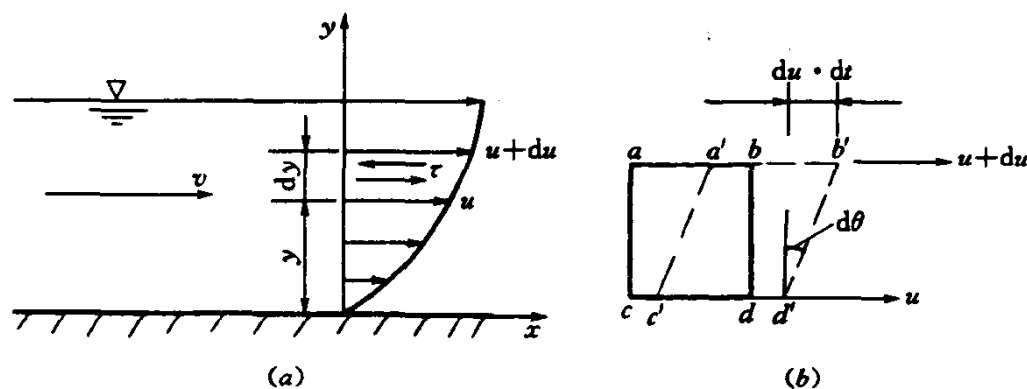


图 1-1

会产生一对大小相等，方向相反的内摩擦力。上层液体对下层液体的作用力方向与流动方向相同，下层液体对上层液体的作用力方向与流动方向相反。

早在 1686 年，牛顿根据试验成果首先提出：对于平行直线流动，液体的内摩擦力 F 与液体的性质有关，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

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

这一结论得到了后人验证，被称为牛顿内摩擦定律。式中 μ 为比例系数，称为动力粘滞系数。由于液体的内摩擦力与作用面平行，单位面积上的内摩擦力又称为粘滞切应力，以符号 τ 表示。

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

作用在两相邻液层之间的粘滞切应力 τ ，数值相等，方向相反。

上式中的流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 实际上是液体质点的剪切变形速度，证明如下：

在图 1-1 (a) 所示的流动中取一矩形水质点 $abcd$ ，见图 1-1 (b)。设下层面 cd 的流速为 u ，上层面 ab 的流速为 $u+du$ 。经过 dt 时间，水质点移至 $a'b'c'd'$ 的位置，质点除发生平移外，还因上、下层存在流速差而发生剪切变形。若 ac 和 bd 边的转角为 $d\theta$ ，则剪切变形速度为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。在 dt 时段内， a 点比 c 点、 b 点比 d 点多移动的距离均为 $du \cdot dt$ ，则

$$\begin{aligned} d\theta &\approx \tan(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy} \\ \frac{du}{dy} &= \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (1-9)$$

故流速梯度即为剪切变形速度。将式 (1-9) 代入式 (1-8)，得

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt}$$

由此可以得出一个有关液体的重要特性：液体发生相对运动时，相邻液层之间的切应力与剪切变形速度成正比。液体的性质对切应力的影响通过动力粘滞系数 μ 反映， μ 值愈大，粘滞性愈强。在国际单位制中 μ 的单位为牛顿·秒/米² ($N \cdot s/m^2$) 或帕斯卡秒 ($Pa \cdot s$)。液体的粘滞性还可以表达为动力粘滞系数 μ 与液体密度 ρ 的比值，用符号 ν 表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

ν 称为运动粘滞系数，国际单位制中 ν 的单位是米²/秒 (m^2/s)。

不同的液体的动力粘滞系数 μ 和运动粘滞系数 ν 值是不同的。同一种液体，它们随压强和温度的变化而变化。对于常见的液体，粘滞系数随压强变化很小，一般可以忽略，温度是主要影响因素。不同温度时水的运动粘滞系数值见表 1-3。

上述牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，这类流体在温度不变的条件下，粘滞系数 μ 值不变，粘滞切应力与剪切变形速度成线性关系，如图 1-2 中 A 线所示，这类流体通常称为牛顿流体。另一类流体为理想宾汉体，如泥浆、血浆、牙膏等，这类流体当切应力达到某一数值时，才开始发生剪切变形，但变形率是常数，如图 1-2 中 B 线所示。

表 1-3

不同水温时的运动粘滞系数 ν 值

温 度 (°C)	ν (cm ² /s)	温 度 (°C)	ν (cm ² /s)	温 度 (°C)	ν (cm ² /s)
0	0.01775	14	0.01176	28	0.00839
2	0.01674	16	0.01118	30	0.00803
4	0.01568	18	0.01062	35	0.00725
6	0.01473	20	0.01010	40	0.00659
8	0.01387	22	0.00989	45	0.00603
10	0.01310	24	0.00919	50	0.00556
12	0.01239	26	0.00877	60	0.00478

还有一类是伪塑性流体, 如尼龙、橡胶溶液、颜料、油漆等, 其粘滞系数随剪切变形的速度的增大而减小, 如图 1-2 中 C 线所示。第四类叫膨胀性流体, 如浓淀粉糊、生面团等, 其粘滞系数随剪切变形速度的增加而增加, 如图 1-2 中 D 线所示。B、C、D 线所示的流体均称为非牛顿流体, 不适用牛顿内摩擦定律。所以在应用牛顿内摩擦定律时, 应注意其应用范围。

(四) 压缩性

物体在外力作用下产生变形, 当除去外力后 (在弹性范围内) 能恢复原状的性质, 称为弹性。因为液体只能承受压力, 抵抗体积压缩变形, 当压力除去后能恢复原状, 所以这种性质称为液体的压缩性或弹性。液体受外力作用产生压缩变形时, 在其内部将产生企图恢复原状的内力, 从而影响液体的运动状况。

液体压缩性的大小, 以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 表示。 β 值等于液体体积的相对压缩量 $\frac{dV}{V}$ 与液体压强的增值 dp 之比。由于体积随压强的增大而减小, 故 $\frac{dV}{V}$ 与 dp 的符号相反, β 的表达式为

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

不难看出, β 值愈大, 液体愈易压缩。液体被压缩时, 其质量不会改变, 由此可得

$$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{\rho}$$

将上式代入式 (1-11), 可得

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-12)$$

体积弹性系数 $K = \frac{1}{\beta}$, K 值愈大, 愈不易压缩。在国际单位制中, β 的单位为米²/牛顿

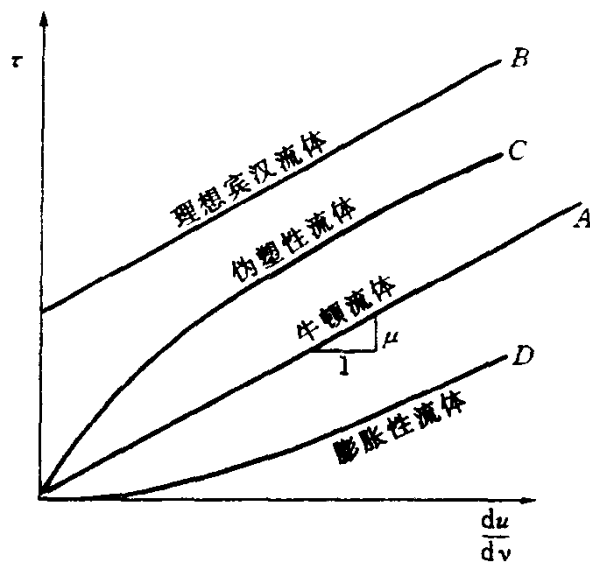


图 1-2

(m^3/N)， K 的单位为牛顿/米² (N/m^2)。

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，一般可视为常数。水的可压缩性很小， 10°C 时， $K=1.96\times 10^6 \text{ kN}/\text{m}^2$ ，容易推算，每增加 1 个大气压，水体积的相对压缩量约为两万分之一。在一般情况下，可认为水是不可压缩的，在实用上已经足够精确。只有在个别情况下，才需要考虑弹性的影响。例如，对于水电站的高压输水管道，当电站出现事故进水闸门紧急关闭时，由于水体的惯性，管道中的水体将受到压缩，压力急剧升高，这时产生的弹性力对水流运动的影响就不能忽略了。

(五) 表面张力特性

液体的自由表面是液体和气体的分界面，由于两侧分子引力不平衡，使自由面上液体分子间存在微小的拉力，称为液体的表面张力。表面张力使液体有尽量缩小其表面的趋势。

表面张力的大小可用表面张力系数 σ 度量。 σ 表示液体表面单位长度上所受的拉力，单位是牛顿/米 (N/m)。 σ 值随液体的种类和温度而变化， 20°C 的水和水银， σ 值分别为 $0.0728\text{N}/\text{m}$ 和 $0.514\text{N}/\text{m}$ 。

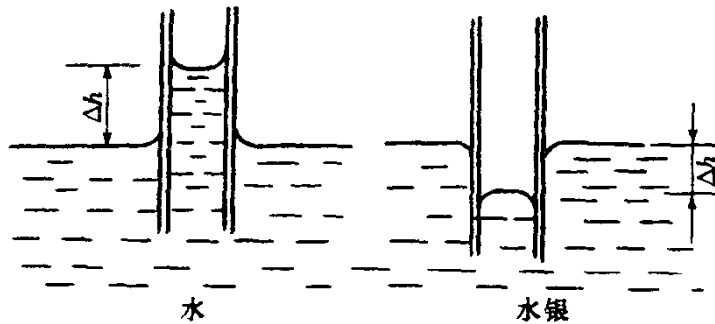


图 1-3

表面张力很小，一般情况下可忽略不计。但是，当液面的曲率很大时，表面张力的影响就必须加以考虑。例如，在水力学实验中，经常用盛有水或水银的细玻璃管量测压强，由于表面张力的作用，使管中的液面与容器中的液面不在同一水平面上，如图 1-3 所示，这就是物理学中所说的毛细管现象。由于玻璃与水分子之间的附着力大于水分子之间的吸引力，管中弯液面高于容器中的液面。

玻璃与水银分子之间的附着力小于水银分子之间的吸引力，则管中弯液面低于容器中的液面。管子与容器中的液面高差 Δh ，除和液体的性质有关，还与管径有关。管子内径愈小，差值就愈大。为了减少测量误差，测压管的内径不宜太小，一般应大于 10mm 。

上述五种液体的物理力学性质，在水力学研究中，惯性、万有引力特性和粘滞性较为重要，它们对水流运动的影响较大。压缩性只在某些情况下才予以考虑，而表面张力一般都可以忽略不计。

液体的运动是非常复杂的，水力学中为了使问题分析简化，在研究液体运动时，常引入理想液体的概念。理想液体即绝对不可压缩、没有粘滞性和表面张力的连续介质。前面已讲到，实际液体的压缩性和表面张力很小，所以没有粘滞性是理想液体和实际液体的最主要的区别。理想液体在自然界中是不存在的。

第三节 作用于液体上的力

无论处于运动状态或平衡状态的液体，都受到力的作用。这些力从物理性质上可分为惯性力、重力、粘滞力、弹性力和表面张力等，如果按作用形式又可分为质量力和表面力

两种。

一、质量力

质量力是由液体的质量而产生的作用力，它作用于液体的每个质点上，与液体的质量成比例，如惯性力、重力都属于质量力。对于均质液体，质量和体积成比例，故质量力又称为体积力。作用于单位质量液体上的质量力，称为单位质量力，其单位是米/秒² (m/s²)。若液体的质量为 M ，作用于上面的质量力为 F ，则单位质量力 $f = F/M$ 。设质量力 F 在空间坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ，单位质量力 f 在坐标轴上的投影为 X 、 Y 、 Z ，那么

$$X = \frac{F_x}{M}; \quad Y = \frac{F_y}{M}; \quad Z = \frac{F_z}{M} \quad (1-13)$$

二、表面力

作用于液体表面上的力称为表面力。它与受作用的液体表面积成比例，如固体边界对液体的作用力；相邻两部分液体，一部分对另一部分产生的水压力等，都属于表面力。表面力可分为垂直作用面的压力和平行作用面的剪切力（液体几乎不能承受拉力，可忽略）。单位面积上作用的表面力称为应力。垂直液体表面的应力称为压应力或压强，用符号 p 表示；平行液体表面的应力称为切应力，用 τ 表示。

第四节 水力学的研究方法

理论分析和科学试验是水力学研究采用的最基本两种方法。

一、理论分析

水力学建立在物理学和力学的理论基础之上，它应用物理学和力学的基本原理，通过严格的数学分析，建立了液体平衡和运动的基本方程，如液体的平衡方程、流动液体的连续方程、能量方程和动量方程等，奠定了水力学的理论基础。随着科学实验以及试验观测水平的不断提高，进一步推动了水力学理论的发展，并在科学实验的基础上，形成了近代水力学的系统理论。理论分析，就是利用这些理论分析、解决工程建设中所提出的各种水力学问题。

二、科学实验

由于水流运动的复杂性和水利水电工程的不重复性，生产实践会不断提出一些还不能完全用理论予以解决的水力学问题，这就需要借助科学试验。现阶段研究水力学问题所进行的科学试验主要有三种。

(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) 系统实验。为了研究专门的水力学问题，在实验室按要求造成特定的人工水流现象，所进行的系统的观测试验。

(3) 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，特别对一些重要工程提出的问题，仅仅靠理论分析是不够的，这时可依据水力相似原理，按一定的比例尺，把实际工程缩小为模型，在模型上预演原型上相应的水流运动，然后把模型上的试验成果，按照相似关系换算出原型的数值，以满足工程设计的需要。

模型试验在工程实践中得到了广泛的应用。

在科学试验中为了从观测的试验数据,抽象出水流的运动规律,除了以理论为指导和利用数理知识分析、处理试验数据外,还需要应用“量纲分析”这个工具。下面让我们了解一下量纲分析的基本概念。

(1) 量纲。在水力学研究中,需要用物理量表述水流现象及其运动规律,如长度、时间、力、流速、粘滞系数等。这些物理量按其性质不同可分为各种类别,用量纲(也叫因次)标志,如长度用 $[L]$ 、质量用 $[M]$ 、时间用 $[T]$ 、力用 $[F]$ 等。量纲与单位不同,单位是度量物理量数值大小的标准,如时间为1小时,可用60分钟、3600秒等不同的单位表示,但无论用何种单位计量时间,它们都具有同一的时间量纲。

量纲可分为基本量纲和诱导量纲。基本量纲是一组彼此独立,不能相互表示,但可以表示其它物理量的量纲。由基本量纲推导出的其它物理量的量纲,称为诱导量纲。对于力学问题,任何一个物理量的量纲都可以由彼此独立的量纲 $[L]$ 、 $[T]$ 、 $[M]$ 导出,如速度、加速度、力的量纲可分别表示为 $[V] = [L] / [T] = [LT^{-1}]$; $[a] = [L] / [T^2] = [LT^{-2}]$; $[F] = [M] \cdot [a] = [M] \cdot [LT^{-2}] = [MLT^{-2}]$ 。所以一般取长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 、质量 $[M]$ 为基本量纲,其它物理量的量纲均为诱导量纲。在国际单位制中,长度的单位用米(m),时间的单位用秒(s),质量的单位用千克(kg)。过去我国工程界常使用工程单位制,工程单位制是以长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 和力 $[F]$ 作为基本量纲,长度的单位用米(m),时间的单位用秒(s),力的单位用公斤力(kgf),质量的量纲为诱导量纲,可导出为

$$[M] = [F]/[a] = [F]/[LT^{-2}] = [FT^2L^{-1}]$$

其单位为公斤力·秒²/米(kgf·s²/m)。两种单位制力和质量的换算关系为

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

$$1\text{kg} = \frac{1}{9.8}\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} = 0.102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

如果物理量的量纲可简化为 $[1]$,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 $[J] = [L] / [L] = 1$,即为无量纲数。

(2) 量纲的和谐原理。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。大家知道,两个物理量能够相加减的必要条件是两个物理量是同类的,也就是说,具有相同的量纲。若把两个不同量纲的物理量相加减是没有意义的,例如把流速和质量加在一起没有任何意义。但是不同类型的物理量却可以相乘除,得到的为诱导量纲的另一个物理量。如流速和质量相乘可得动量,其量纲为 $[MLT^{-1}]$ 。

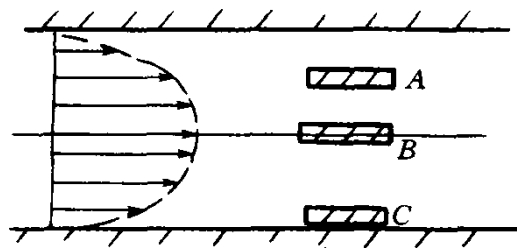
利用量纲和谐原理既可以用来检查所建立的方程式或经验公式的正确性和完整性,而且还可以在试验研究的基础上,通过量纲分析建立物理方程。量纲分析的方法通常有两种,即雷列法和 π 定理,可参阅有关水力学教科书。

习 题

1-1 已知海水的密度 $\rho = 1030\text{kg/m}^3$,求它的容重值。

1-2 水的容重 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$, 动力粘滞系数 $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 求其运动粘滞系数 ν 。空气的容重 $\gamma = 11.5 \text{ N/m}^3$, 运动粘滞系数 $\nu = 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 求其动力粘滞系数。

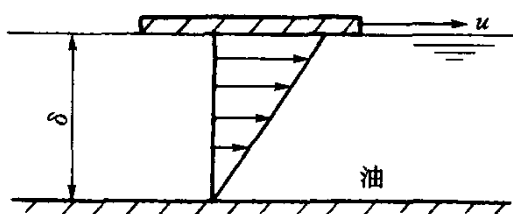
1-3 在两平行壁面间流动的液体, 流速分布如题 1-3 图所示, 试说明: ①最大、最小切应力的位置和最小切应力的值; ②作用于微小矩形液块 A、B、C 上下两面的内摩擦力的方向。



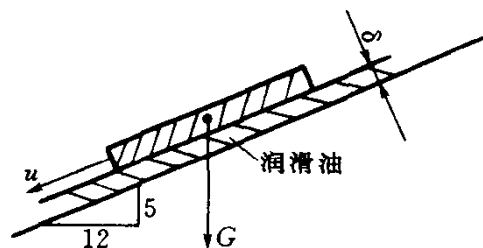
题 1-3 图

1-4 题 1-4 图所示一平板在油面上作水平运动, 已知速度 $u = 1 \text{ m/s}$, 板与固定边界的距离 $\delta = 1 \text{ mm}$, 油的动力粘滞系数 $\mu = 1.15 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 由平板带动的油层的运动速度呈直线分布, 求作用在平板单位面积上的粘滞阻力为多少?

1-5 一底面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$, 高为 1 cm 的木块, 质量为 5 kg , 沿着涂有润滑油的斜面向下等速运动, 如题 1-5 图所示。已知木块运动速度 $u = 1 \text{ m/s}$, 油层厚度 $\delta = 1 \text{ mm}$, 由木块所带动的油层的运动速度呈直线分布, 求油的动力粘滞系数。



题 1-4 图



题 1-5 图

1-6 水箱中盛有静止液体, 试问此时液体所受的单位质量力为多少?

1-7 将下列用工程单位制表示的物理量改为国际单位制表示。

①一个大气压下, 4°C 时水的容重为 1000 kgf/m^3 ; ②质量为 $1 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 的物质; ③作用在闸门上的静水总压力为 $5 \times 10^4 \text{ kgf}$ 。

1-8 若 $h = \frac{p}{\gamma}$, γ 为液体的容重, p 的量纲为 $[F/L^2]$, 试问 h 的量纲是什么?

1-9 若以质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 为基本量纲, 试推求动力粘滞系数 μ , 运动粘滞系数 ν 的量纲表达式。

第二章 水 静 力 学

水静力学是研究液体平衡的规律及其在工程实际中应用的学科。

液体的平衡状态有两种：一种是静止状态，即液体相对地球没有运动，例如湖泊和蓄水池中静止不动的水；另一种是相对静止状态，即液体相对地球虽有运动，但液体与容器之间及液体质点之间都不存在相对运动，例如作等速或等加速运动的油罐车中的石油，等角速旋转容器中的液体都属于相对静止状态，又称相对平衡状态。

处于平衡状态的液体，液体质点之间不存在相对运动，液体质点之间就不产生内摩擦力，所以水静力学问题中不考虑粘滞性。

水静力学的主要任务是根据液体的平衡规律，计算静水中的点压强，确定受压面上静水压强的分布和求解作用在固体边界上的静水总压力。

第一节 静水压强及其特性

一、静水压强

1. 静水压力

如图 2-1 所示为涵洞式水闸中设置的平板闸门，当上游有水时开启闸门比无水开启闸门需要更大的拉力，其原因是水闸上游的水对闸门作用了很大的压力，使闸门紧贴闸门槽，

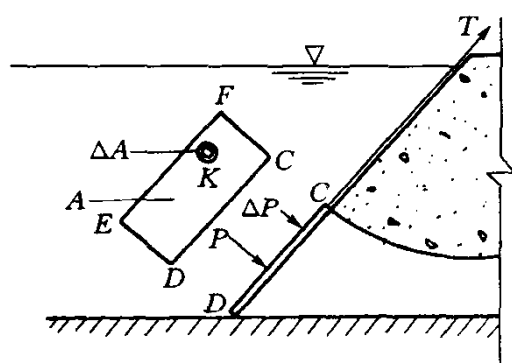


图 2-1

而产生较大的摩擦力。象这种平衡液体作用在与之接触的表面(可以是固体表面也可以是液体表面)上的水压力称为静水压力，常以字母 P 表示。在国际单位制中，静水压力的单位为牛顿 (N) 或千牛顿 (kN)。

2. 静水压强

在图 2-1 所示的平板闸门上，取微小面积 ΔA ，令作用于上的静水压力为 ΔP ，则 ΔA 上所受的静水压力为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

$\bar{p}$ 称为 ΔA 面上的平均静水压强。

由于受压面各点的静水压强一般不等，为了反映受压面各点压强的变化情况，须建立点静水压强的概念。图 2-1 中，当 ΔA 无限缩小并趋于点 K 时，比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限值定义为 K 点的静水压强，即

$$p_K = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-2)$$

在国际单位制中，静水压强的单位为牛顿/米² (N/m²) 或千牛顿/米² (kN/m²)，分别又称为帕斯卡 (Pa) 或千帕斯卡 (kPa)。

二、静水压强的特性

静水压强有两个特性。

(1) 静水压强的方向垂直并指向受压面。

证明：在平衡液体中取出一块液体，用任一平面 $N-N$ 将液体分为 I、II 两部分，如图 2-2 (a) 所示。取出下半部 II 为隔离体，如图 2-2 (b) 所示。切割面上的作用力就是两部分液体之间的相互作用力。设切割面上某点 K 所受的静水压强为 p ，若 p 不是垂直于切割面，则 p 可分解为切向分量 p_τ 和法向分量 p_n 。在绪论中已指出，静止液体不能承受剪切力，也不能承受拉力，显然切向分量的存在将使 I、II 两部分发生剪切，从而破坏液体的平衡。若 p 是指向作用面的外法线方向，则 I、II 两部分将存在拉力，液体平衡也将遭到破坏，这和平衡液体的前提条件相矛盾，所以 p 只能垂直且指向切割面。

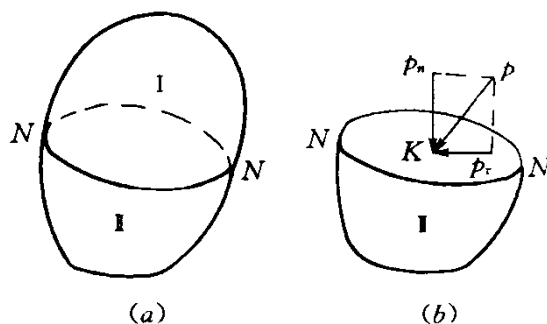


图 2-2

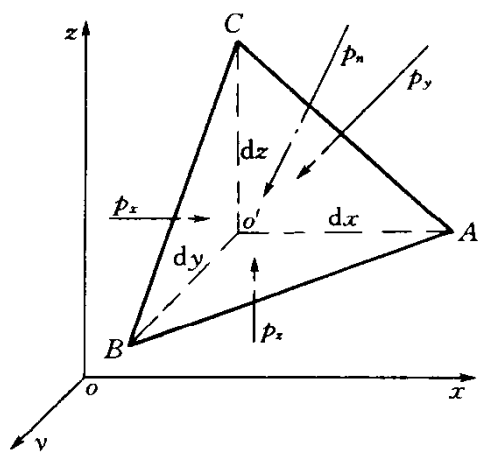


图 2-3

(2) 任一点静水压强的大小和受压面的方位无关，也就是说作用于同一点上各方向的静水压强的大小相等。

证明：设在平衡液体中，以 O' 为顶点取一微小四面体 $O'ABC$ ，为了便于分析，令其三条棱边 dx 、 dy 、 dz 相互垂直并分别与 x 、 y 、 z 轴平行，倾斜面为任意方向，面积为 dA_n ，如图 2-3 所示。

下面对微小四面体进行受力分析。作用在微小四面体上的力有表面力和质量力，首先分析表面力。

从静水压强的第一特性可知，作用于微小四面体的表面力只有压力，设作用于微小四面体三个相互垂直平面和斜面上的压强分别为 p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n ，由于是微小四面体，可以认为各微小面积上的静水压强分布是均匀的，作用在各个面上的静水压力等于各自面上的压强和相应面积的乘积，即

$$\left. \begin{aligned} dP_x &= p_x \cdot \frac{1}{2} dydz \\ dP_y &= p_y \cdot \frac{1}{2} dzdx \\ dP_z &= p_z \cdot \frac{1}{2} dxdy \\ dP_n &= p_n dA_n \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由几何学可知，微小四面体的体积为 $\frac{1}{6} dxdydz$ ，质量为 $\frac{1}{6} \rho dxdydz$ 。设单位质量力在 x 、 y 、 z 轴上的投影分别为 X 、 Y 、 Z ，则作用于微小四面体上的质量力 dF 在各坐标轴上的投影分别为 $dF_x = \frac{1}{6} \rho dxdydz X$ ， $dF_y = \frac{1}{6} \rho dxdydz Y$ ， $dF_z = \frac{1}{6} \rho dxdydz Z$ 。

因微小四面体取自于平衡液体，也处于平衡状态，故上述各力在各坐标轴方向上的投影之和分别等于零。