

中等专业学校教材

水 力 学

上 册

(第 二 版)

陕西省水利学校 李序量 主编

水利电力出版社

43

3

中等专业学校教材

水 力 学

上 册

(第二版)

陕西省水利学校 李序量 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是1978年12月出版的中等专业学校通用教材《水力学》的修订本。全书共十一章，分上、下两册出版。上册包括绪论，水静力学，水流运动的基本原理，水流型态和水头损失，管流等五章。下册包括明渠均匀流，明渠非均匀流，孔流与堰流，水工建筑物上、下游水流衔接与消能，高速水流简介，水力学模型试验基础等六章。

本书适用于水工建筑、农田水利、水文等专业，也可供水利水电技术人员参考。

中等专业学校教材

水力学 上册

(第二版)

陕西省水利学校 李序量 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.125印张 180千字

1978年12月第一版

1984年7月第二版 1990年5月北京第七次印刷

印数128301—155850册

ISBN 7-120-01095-6/TV·374

定价1.55元

第二版前言

本书是在1978年12月出版的中等专业学校通用教材《水力学》的基础上，根据水电部教育司1981年审定颁发的水利电力类中等专业学校各专业《水力学教学大纲》，修订而成。

在修订过程中，遵照教材建设应该有相对的稳定性及连续性的原则，尽量在原有教材的基础上进行修改；根据教材内容要“少而精”的原则，在保证满足水力学教学要求的情况下，压缩了篇幅；为了结合近几年来水利水电事业的发展，照顾到某些专业的特点及不同要求，也增加了一些新内容，并努力联系实际；为了巩固理论，提高学生分析、计算能力，各章都有一定数量的习题和思考题。

使用本书时，不同专业应针对本专业的要求，对内容作必要的取舍；大纲中有些专业要求的个别内容，因考虑到专业性较强，且限于篇幅，未予编入；书中小号字的内容是供教学参考的。

参加本书修订工作的有黄河水校邵平江同志（第二、四、十、十一章），陕西水校李勉同志（第一、三、五章），李序量同志（第六、七、八、九章）。由李序量同志主编，东北水电校刘翰湘同志主审。

本书在修订过程中，许多水电学校多年从事水力学教学工作的老师们提出了宝贵的意见，在此致以谢意。

我们恳切地希望读者对书中的缺点及错误给予批评指正。

编者

1983年9月

前 言

为了适应新时期教育事业的大发展，满足教学需要，提高教学质量，我们总结二十八年来正反两方面的经验，根据《中等专业学校〈水利工程建筑〉专业教学计划》征求意见稿（一九七八年一月制订）的要求，编写了这本教材。

在编写过程中，我们力求做到：以毛主席关于马克思主义的认识论的光辉思想为指导，阐述水流运动的基本规律以及各种水力学问题，培养学生分析问题和解决问题的能力；加强对水流运动的基本理论以及水力计算和实验操作等基本技能的训练和培养；教材内容尽量结合水利工程的实际，并适应水利水电学校有关专业的特点；文字通俗易懂，每章均有例题、内容提要、小结、思考题和习题，以便于自学。

本教材由陕西省水利学校李序量、程学文，黄河水利学校邵平江、赵彦南、白济民，安徽省水利电力学校蔡可法，成都水力发电学校龙孝谦等七位同志编写，李序量同志主编。孟丰秀等同志绘图。

本教材由吉林省水利电力学校刘翰湘、陈浩两同志主审，水电部东北勘测设计院孙思惠、吉林省水利勘测设计院张彤、长春地质学院刘一贯等同志参加审稿，提出不少宝贵意见，并得到了吉林省水利电力学校的大力协助，编者谨在此表示谢意。

我们恳切希望广大师生对书中缺点错误给以批评指正。

编 者

1978年7月

目 录

前 言

第二版前言

第一章 绪论	1
第一节 水力学的任务及其在水利工程中的应用	1
第二节 液体的基本特性和主要物理力学性质	2
第二章 水静力学	7
第一节 静水压强及其特性	7
第二节 静水压强的基本规律	9
第三节 静水压强的表示方法及量测	12
第四节 静水压强分布图	16
第五节 作用在平面壁上的静水总压力	17
第六节 作用在曲面壁上的静水总压力	21
第七节 重力和惯性力同时作用下液体相对平衡举例	25
第三章 水流运动的基本原理	33
第一节 水流运动的基本概念	33
第二节 恒定流的连续性原理	38
第三节 恒定流的能量原理	40
第四节 能量方程应用举例	49
第五节 相对运动的能量方程	53
第六节 恒定流的动量原理	55
第四章 水流型态和水头损失	66
第一节 液体的粘滞性	66
第二节 运动液体的两种基本流态	67
第三节 紊流运动	71
第四节 水头损失及其分类	75
第五节 沿程水头损失的分析和计算	77
第六节 局部水头损失的分析和计算	86
第七节 绕流阻力与升力	91
第五章 管流	97
第一节 概述	97
第二节 短管的水力计算	98
第三节 长管的水力计算	102
第四节 短管水力计算举例	107
第五节 压力管中的水击简介	111
附录 习题答案(第一章至第五章)	121

第一章 绪 论

第一节 水力学的任务及其在水利工程中的应用

水和人类生活、社会生产有着十分密切的关系。早在几千年前，我国劳动人民就已开始与洪水灾害进行不懈的斗争。以后，随着生产发展的需要，在与水害作斗争的同时，还兴修了许多巨大的灌溉、航运工程。人类在与水作斗争、防止水害、兴修水利的过程中，逐渐认识了水的运动规律，而对这些规律的认识，又进一步促进了水利事业的发展。这样反复循环、不断提高，加上现代科学与实验技术的发展，逐渐形成了一种专门研究液体静止和运动的规律，探讨液体和各种边界之间的相互作用，并应用这些规律解决实际问题的科学。这门科学就是水力学。

水力学是一门技术科学，它是力学的一个分支，分为水静力学和水动力学两部分。水静力学研究液体处于静止（或相对平衡）状态下的力学规律。水动力学研究液体在管道、河渠中以及流经各种水工建筑物时的运动规律。

水力学在水利、机械、冶金、化工、石油开采和城市建筑等工程中应用广泛。特别是在水利工程的勘测、设计、施工与管理中，更会遇到很多的水力学问题。

例如，在河道上修建水利枢纽工程，用来调节洪水、储蓄水量和抬高水位，以满足防洪、灌溉和发电等方面的要求。修建水利工程要在河道中筑坝挡水（参见图 1-1 水利枢纽工程平面布置示意图）。重力坝受水的作用力后仍须保持稳定。对于土坝，要考虑坝身和坝基渗流造成的水量损失和它可能的破坏作用。从水库取水要修输水管道。管道及其首部的闸门必须能承受水的作用力。管道本身还要有足够的过水能力。为保证拦河坝的安全，需修建有足够泄洪能力的溢洪道，洪水从溢洪道下泄，往往冲刷下游河床危及建筑物的安全，因而必须采取消能措施。修水库还要考虑对河道的影响，计算坝上游的回水长度以确定水库的淹没范围，计算坝下游河道的安全泄量，以及上游的淤积和下游的冲刷等问题。

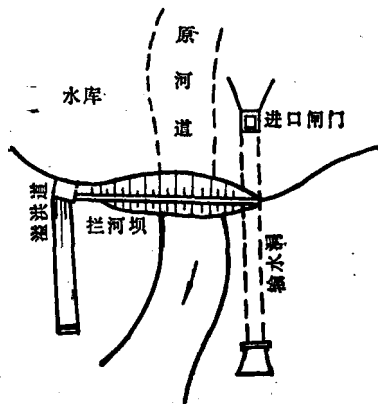


图 1-1

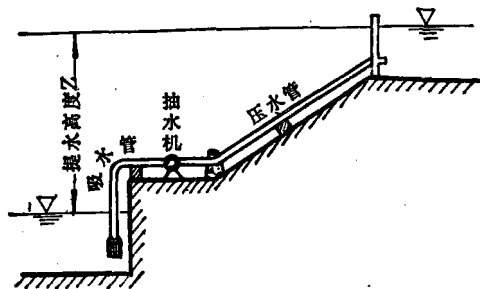


图 1-2

又如抽水站用动力把水从低处抽到高处，抽一定的水量究竟需要多大功率的抽水机，要根据提水高度 Z 、设计流量和管路中的能量损失来计算（图1-2）。

从以上例子看来，每项水利工程以及工程中各种水工建筑物都有不同的水力学问题。归纳起来主要有以下五个方面：

1）水对水工建筑物的作用力问题。如坝身、闸门、闸身、管壁上的静水作用力和动水作用力问题。

2）水工建筑物的过水能力问题。如管道、渠道、闸孔和溢流堰的过水能力问题。并有如何提高其过水能力的问题。

3）水流通过水工建筑物的能量损失问题。如水流通过水电站、抽水站、管道、渠道等各种水工建筑物时所引起的能量损失问题，以及溢流坝、溢洪道、水闸和跌水下游的消能问题。

4）河渠的水面曲线问题。如河道、渠道、溢洪道和陡坡中的水面曲线问题。

5）水工建筑物中水流的形态问题。如水流在各种水工建筑物中流动形态的判别及其对工程的影响等问题。以及如何改善水流形态防止不利影响的问题。

以上是水利工程中常见的主要问题，它们彼此不是孤立的，也不是水力学的全部问题。此外，还有其它一些水力学问题，如渗流问题、挟沙水流问题、高速水流问题、波浪运动问题以及水力学模型试验的有关问题。

为了解决上述水力学问题，必须研究水流运动的基本规律，只有对这些规律有透彻的了解，才能正确掌握水力分析和水力计算。由于水流运动的复杂性，目前尚有不少水力学问题不能完全用理论分析的方法来解决，有时还需借助于水力试验。因此，也应重视水力试验技术方面的学习和操作。

学习水力学，不仅要研究液体运动的各种规律，更重要的是要利用这些规律有效地解决工程中的实际问题。努力为发展祖国的水利事业和水利科学、为把我国在本世纪末建设成为具有现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的伟大的社会主义国家而奋斗。

第二节 液体的基本特性和主要物理力学性质

水力学的任务是研究并应用液体静止和运动的规律，研究的对象是液体。液体的静止和运动规律，一方面和液体外部的作用条件有关，更主要的是决定于液体本身的内在性质。本节将介绍液体的基本特性和主要物理力学性质。

一、液体的基本特性

物质有固体、液体和气体三种存在形式。液体和固体的基本区别在于：固体有一定的形状；而液体却没有固定的形状，很容易流动，它的形状随容器而异（因液体几乎不能承受拉力抵抗拉伸变形，静止时不能承受切力抵抗剪切变形），即液体具有易流动性。气体与液体一样，也具有易流动性，所以统称为流体。液体和气体的区别在于：气体易于压缩，

并力求占据尽可能大的容积，能充满任何容器；而液体能保持一定的体积，还可能有自由表面，并且和固体一样能承受压力。液体压缩的可能性很小，在很大的压力作用下，其体积缩小甚微，即液体具有不易压缩性。

液体的真实结构是由运动着的分子所组成的，分子与分子间具有空隙。从微观角度看，液体是不连续、不均匀的。但水力学中研究的不是液体的分子运动，而是液体的宏观机械运动，把液体的质点作为最小的研究对象。质点是由极多液体分子所组成的，但它仍然非常微小，和所研究问题中的一般尺度相比，可以忽略不计。因此可认为液体的质点是一个挨着一个地充满全部液体的。这样，就可以把液体当作由无数液体质点所组成的连续介质，而且可以把这种连续介质看作均质的和各向同性的。即它的各部分和各方向上物理性质是一样的。这种假定是为了便于充分利用连续函数这一有力的数学工具。实践证明，所得结论在一般情况下也是符合客观实际的。

总之，在水力学中研究的液体是一种容易流动、不易压缩、均质等向的连续介质。水力学研究成果，也适用于以水为代表的一般液体。

二、液体的主要物理力学性质

物体运动状态的改变是受外力作用的结果。而任何一种力的作用都是通过液体本身的性质来实现的。下面研究一下影响液体运动的几个主要物理力学性质。

（一）惯性·质量与密度

惯性就是物体要保持其原有运动状态的特性。根据牛顿第二定律，要改变物体的运动状态时必须施加力，其大小与物体的质量和加速度的乘积成正比。这个施加的力就是用来克服物体惯性的。因此，物体惯性的大小可以用质量来度量。质量愈大的物体，惯性也愈大。当液体受其他物体的作用力而改变其原来运动状态时，液体反抗改变其原有运动状态而作用在其他物体上的反作用力称为惯性力。若液体的质量为 m ，加速度为 a ，则惯性力 F 为

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

负号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。

液体单位体积中所具有的质量称为液体的密度 ρ 。如有一质量为 m 的均质液体，其体积为 V ，则其密度 ρ 可表示为

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

在国际单位制(S.I)中，质量采用的单位为千克(kg)，长度单位采用米(m)，则密度的单位为千克/米³(kg/m³)。在一个大气压下温度为4℃时，水的密度为1000千克/米³。液体的密度随温度和压强有所变化，但这种变化很小，所以水力学中一般把水的密度视为常数。

（二）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具有互相吸引力的性质。这个吸引力称为万有引力。地球对物体的吸引力称为重力，或称为重量 G 。国际单位制中力的单位为牛顿(N)。一质量为 m 的液体，其所受重力 G 的大小为

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

式中 g ——重力加速度。一般采用 9.80 米/秒^2 的数值。

液体单位体积内所具有的重量 G 称为容重 γ 。对某一重量为 G ，体积为 V 的均质液体，其容重 γ 可表示为

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

式 (1-3) 两边都除以体积 V 则成为

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

国际单位制中容重的单位为牛顿/米³ (N/m^3)。不同的液体，容重是不同的，即使同一种液体的容重也随温度和所受的压强而变化，但因水的变化甚微，可视为常数。水的容重，在一个大气压和 4°C 时为

$$\gamma = \rho g = 1000 \text{ 千克/米}^3 \times 9.8 \text{ 米/秒}^2 = 9800 \text{ 牛顿/米}^3$$

工程单位制中，重量的单位（即重力的单位）为公斤力或吨力，长度为米，于是容重为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{\text{公斤力}}{\text{米}^3} \quad (\text{kgf/m}^3)$$

例如，水的容重用工程单位表示时为 1000 公斤力/米^3 或 1 吨力/米^3 。而水的密度用工程单位表示时，应为

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000}{9.8} = 102 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$$

由此可知，用工程单位制时密度的单位为 $\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ 。因质量 $m = \rho V$ ，所以质量的单位为 $\text{公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}$ 。

例1-1 求在一个大气压下， 4°C 时，一升水的重量和质量。

解 已知体积 $V = 1 \text{ 升} = 0.001 \text{ 米}^3$

采用国际单位制时，水的容重为 $\gamma = 9800 \text{ 牛顿/米}^3$ ，于是可得一升水的重量为

$$G = \gamma V = 9800 \times 0.001 = 9.80 \text{ 牛顿}$$

水的密度为 $\rho = 1000 \text{ 千克/米}^3$ ，于是可得一升水的质量为

$$m = \rho V = 1000 \times 0.001 = 1 \text{ 千克}$$

采用工程单位制时，水的容重 $\gamma = 1000 \text{ 公斤力/米}^3$ ，水的密度 $\rho = 102 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ ，于是可得一升水的

$$\text{重量 } G = \gamma V = 1000 \times 0.001 = 1 \text{ 公斤力}$$

$$\text{质量 } m = \rho V = 102 \times 0.001 = 0.102 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}$$

关于工程单位制和国际单位制的换算，可参考附录I。

(三) 粘滞性

液体运动时若质点之间存在着相对运动，则质点间就要产生一种内摩擦力来抵抗其相对运动，这种性质即为液体的粘滞性。此内摩擦力称为粘滞力。粘滞性是液体固有的物理属性。

如图 1-3, 液体沿一固定平面壁作平行的直线运动。紧靠固体壁面的第一层极薄水层粘在壁面上不动, 第一层将通过摩擦作用影响第二层的流速, 而第二层又通过摩擦(粘滞)作用影响第三层的流速, 依此类推, 离开壁面的距离愈大, 壁面对流速的影响愈小, 于是靠近壁面的流速较小, 远离壁面的流速较大(图 1-3, a)。由于各层流速不同, 它们之间就有相对运动, 上面一层流得较快, 它就要拖动下面一层; 而下面一层流得较慢, 它就要阻止上面一层。于是在两液层之间就产生了内摩擦力, 如图 1-3 (b) 所示。快层

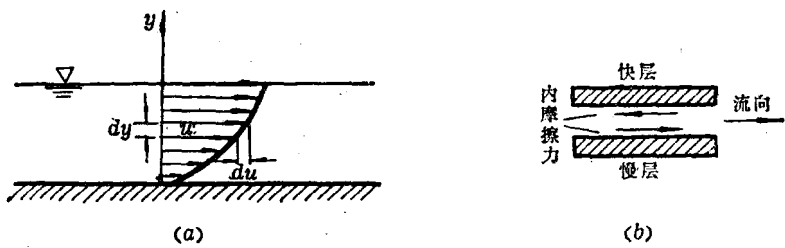


图 1-3

对慢层的内摩擦力是要使慢层快些; 而慢层对快层的内摩擦力是要使快层慢些。即所发生的内摩擦力是抵抗其相对运动的。这种性质就是粘滞性。

应指出, 由于运动液体内部存在摩擦力, 于是液体在运动过程中为克服内摩擦阻力就要不断地消耗液体的能量。所以粘滞性是引起液体能量损失的根源。

(四) 压缩性

固体受外力作用要发生变形, 当除去外力后有恢复原状的能力, 这种性质称为物体的弹性。与固体一样, 液体也具有弹性。即液体受压力作用后产生压缩变形(体积缩小), 除去压力后变形即消失。这种性质称为液体的压缩性。液体的压缩性可用体积压缩系数表示。体积压缩系数是液体体积相对缩小值与压强增值之比。若某一液体体积为 V , 原受压强为 p , 当压强增加 dp 后, 体积缩小 dV , 则其体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-6)$$

式中负号是由于压强增大时, 体积要缩小。液体体积压缩系数 β 的倒数就是体积弹性系数 K

$$K = -\left(\frac{V}{dV}\right)dp \quad (1-7)$$

式中 V/dV 是一个比值。因而 K 的单位和 p 的单位相同, 都是牛顿/米²。

在一般情况下, 水的体积压缩量不大。增加一个大气压, 水体积的缩小不足 1/20000, 因此在一般的水力计算中, 水的压缩性可不考虑, 认为水是不可压缩的。但对某些特殊情况, 就必须考虑水受压缩后的弹性。如水电站高压管道中的水流, 当电站出现事故, 阀门突然关闭后, 管道中压力急剧升高, 液体受到压缩, 由此而产生的弹性力对运动的影响就不能忽视了。

(五) 表面张力特性

液体表层由于分子间的吸力而形成一个类似薄膜的表面。这个表面能承受一定的拉力，称为表面张力。通常表面张力数值很小，仅在水的表面形成曲率很大的曲面时，表面张力才产生显著的影响。例如将一根细玻璃管插入静水中，管中的水面将高于静水面，这便是受了表面张力的影响。但在一般的水力学问题中，都可以忽略表面张力的影响。

以上介绍了液体的几种主要物理力学性质。其中以惯性、万有引力特性和粘滞性最重要，它们对液体运动的影响也最大。

实际液体的物理性质是很复杂的。为了简化问题便于进行理论分析，在研究液体运动时常常先把实际液体看作理想液体，即把所研究液体假定为完全无粘滞性的，得出有关规律后，再进一步研究较复杂的实际液体的运动规律。研究理想液体的运动，可以作为分析实际运动的台阶，同时也可近似地反映粘滞性作用不大的实际液体流动的情况。

思考题

1-1 学习水力学课程的目的是什么？

1-2 液体的粘滞性在什么条件下才能表现出来？试举几个例子。

1-3 什么叫理想液体？在自然界或实际研究中，有没有近似理想液体的流动？

习题

1-1 500升的水在一个大气压下 4°C 时，它的重量和质量按国际单位制计算各有多大？

1-2 把上题计算结果换算成以工程单位制表示的数值。

1-3 已知海水的容重为 10000 牛顿/米^3 ，若以牛顿/升，及牛顿/厘米³来表示，其容重各为多少？

1-4 酒精的容重为 8000 牛顿/米^3 ，它的密度以国际单位制来表示应为多少？

第二章 水 静 力 学

第一节 静水压强及其特性

一、静 水 压 强

由实践知：木桶无箍，盛水就会散开；未钉结实的木桶底，盛水会掉；游泳时水淹过胸，人就会感到胸部受压。通过这些现象，人们形成一个概念：处于静止状态的水体，对与水接触的壁面（侧壁和底面）以及水的内部质点之间都有压力的作用。

水在静止状态时的压力叫静水压力，在流动时的压力叫动水压力。本章只研究静水压力。

静止液体内的压力状况，常用单位面积上静水的压力——静水压强来表示。其数学表达式为

$$p = \frac{P}{\omega}$$

式中 P ——静止液体作用于某受压面上总的力，叫静水总压力，单位为牛顿（简称牛，国际代号为N）、千牛（kN）；

ω ——受力面积，单位为米²（m²）；

p ——静水压强，单位为牛/米²（N/m²），又称为帕（Pa），千牛/米²（kN/m²），又称为千帕（kPa）。

用上式计算出的静水压强，表示某受压面单位面积上受力的平均值，是平均静水压强。它只有在均匀受力情况下，才真实地反映了受压面各处的受压状况。通常受压面上的受力是不均匀的，所以，用上式计算出的平均静水压强，不能代表受压面上各处的受力状况，因而还必须建立点静水压强的概念。

图2-1为盛水的圆柱形桶。在桶中任取一点A，以A点为中心，围绕它任取一倾斜的微小面积 $\Delta\omega$ ， $\Delta\omega$ 上作用的静水总压力为 ΔP ，这样，作用于微小面积上的平均静水压强为

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$$

当面积 $\Delta\omega$ 无限缩小而趋近于A点时， $\frac{\Delta P}{\Delta\omega}$ 的极限值即为任一点A的静水压强，可

写成

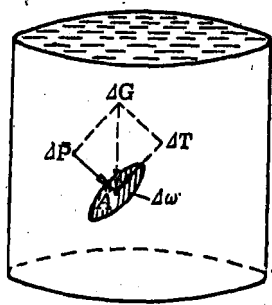


图 2-1

$$p_A = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$$

今后，在水力学中遇到静水压强（或静水压力）这一名词，若无特别说明，均系指点静水压强这一概念。

最后指出，静水总压力和静水压强都可表征静水中的压力状况，但它们是两个不同的概念，因此它们的单位也是不同的。

静水总压力的单位，在国际单位制中是牛顿（N）、千牛顿（kN），在工程单位制中是公斤力（kgf）、吨力（tf）。

静水压强的单位，在国际单位制中是帕斯卡（Pa）、千帕（kPa），在工程单位制中是公斤力/厘米²（kgf/cm²）、吨力/米²（tf/m²）。

国际制单位与工程制单位间的换算，可查附录 I。

二、静水压强的特性

首先观察一个实验。

图 2-2 是一个用两端开口的 U 形玻璃管制成的测压计。玻璃管内盛着有色液体。实验前管两端都通大气，这时管中液面在同一高度。用橡皮管把一个扎有橡皮薄膜的小圆盒连到测压管 A 端，B 端仍与大气相通。这时管中液面仍在同一水平面上。

实验开始，用手指压橡皮膜，则 A 管液面降至 C 点，管 B 的液面升高到 D 点。若手指加大压力，则两管的液面差 h 亦加大；手指放开，则液面又恢复到同一水平面上。

如果把橡皮膜放入水中，同样可看到 A 管液面降低，B 管液面升高。入水愈深，与加大手指压力相似，测压管液面差 h 也愈大。这个实验说明，静水中是存在压强的，而且静水压强随水深的增加而增大。

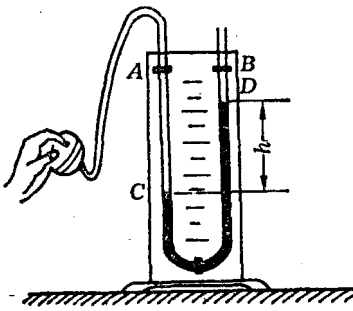


图 2-2

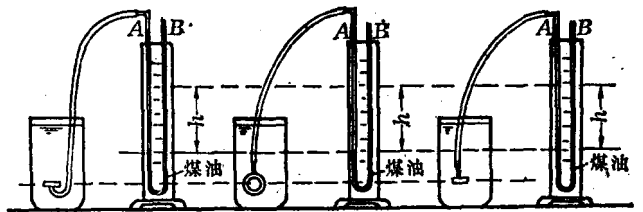


图 2-3

当扎有橡皮薄膜的小圆盒在水中的中心位置不变，使橡皮膜向上、向下、向旁侧转动，测压计两边的液面都是不变的（图 2-3）。

上述实验表明：静水内部任何一点各方向的压强大小是相等的，静水压强大小与作用面的方位无关。这是静水压强的第一个特性。

静水压强的第二个特性是，静水压强的方向永远垂直并指向作用面（也叫受压面）。因静止液体不能承受切力抵抗剪切变形，如果静水压强不垂直作用面，则水体将受到剪切

力作用就会产生流动。因此，处于静止状态的水体内部不可能有剪切力存在。同时，水又不可能抵抗拉力，只能承受垂直并指向作用面的压力。

研究水处于静止状态时的规律，静水压强的这两个特性是很重要的。例如，在图2-4中的边壁转折处B点，对不同方位的受压面来说，其静水压强的作用方向不同（各自垂直于它的受压面），但静水压强的大小是相等的。

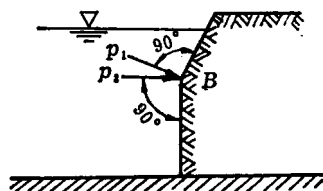


图 2-4

第二节 静水压强的基本规律

一、静水压强基本方程

从前面的实验可知，静水压强是随水深的增加而增加的，但它按什么规律变化呢？必须分析静止液体的平衡条件，导出静水压强的大小及其分布规律。这是水静力学的基本课题。

图2-5 (a) 为仅在重力作用下处于静止状态下的水体。水表面受压强 p_0 的作用， p_0 称为表面压强。现研究位于水面下铅直线上任意两点1、2压强 p_1 和 p_2 间的关系。围绕2点取微小面积 $\Delta\omega$ ，取以 $\Delta\omega$ 为底、 Δh 为高的铅直小水柱为脱离体，进一步分析作用在这一小水柱上的力：

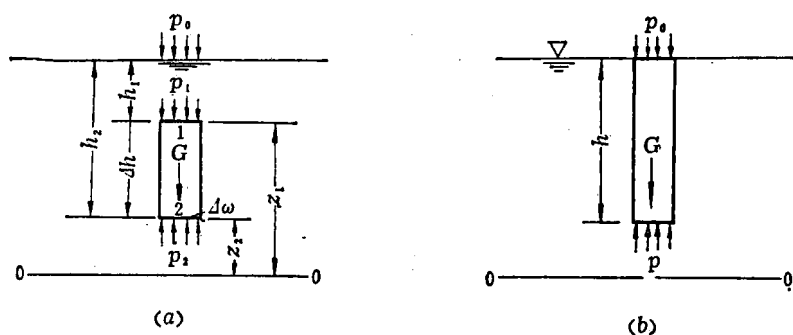


图 2-5

1) 小水柱的自重（即重力）， $G = \gamma \Delta h \Delta\omega$ ，方向铅直向下；

2) 由于 $\Delta\omega$ 很小，可认为该面积上各点的压强是相等的，所以作用于小水柱顶面上的总压力为 $p_1 \Delta\omega$ ，方向铅直向下；

3) 同理，作用于小水柱底面上的总压力为 $p_2 \Delta\omega$ ，方向铅直向上；

4) 作用于小水柱周围表面上的水压力：因小水柱侧面皆为铅直面，侧面所受水压力皆为水平力，因小水柱处于静止状态，侧面上所受的水平力是相互平衡的。

根据静力平衡方程，从铅直方向看，作用于静止小水柱上向上的力必然等于向下的力，即

$$p_2 \Delta\omega = p_1 \Delta\omega + \gamma \Delta h \Delta\omega$$

等式两端除以 $\Delta\omega$ ，可得压强的基本关系式

$$p_2 = p_1 + \gamma \Delta h \quad (2-1)$$

或

$$p_2 - p_1 = \gamma \Delta h \quad (2-2)$$

上式表明：1、2 两点的压强差等于作用在单位面积上、高度为 Δh 的液柱的重量。显然，在水中深处的静水压强比浅处大。向下每增加 1 米深度，静水压强就增大 $\gamma \Delta h = 9.8$ 千牛/米³ × 1 米 = 9.8 千牛/米²。

若根据表面压强 p_0 推算水面下深度为 h 的任一点静水压强 p ，即当图 2-5(a) 中的 $h_1 = 0$ 、 $h_2 = \Delta h = h$ 、 $p_1 = p_0$ 、 $p_2 = p$ 时，如图 2-5(b) 所示，式 (2-1) 可写成

$$p = p_0 + \gamma h \quad (2-3)$$

式 (2-3) 是常见的静水压强基本方程式。它表明：仅在重力作用下，液体中某一点的静水压强等于表面压强加上液体的容重与该点淹没深度的乘积。

由此可见，深度为 h 处的静水压强 p 是由两部分组成的。即从液面传来的表面压强 p_0 及单位面积上高度为 h 的液柱重量。

由式 (2-3) 可推知，若表面压强 p_0 由某种方式使之增大，则此压强可不变大小地传至液体中的各个部分。这就是帕斯卡原理。静止液体中的压强传递特性是制作油压千斤顶、水压机等很多机械的原理。

上述静水压强计算式中，任一点的位置是从水面往下算的，用水深 h 表示。若取共同的水平面 0—0 为基准面，任一点距基准面的高度称为某点的位置高度 z ，则可将 $p_2 - p_1 = \gamma \Delta h$ 变换成另一种形式。由图 2-5 可看出： $\Delta h = z_1 - z_2$ ，代入式 (2-2)，得

$$p_2 - p_1 = \gamma(z_1 - z_2)$$

即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (2-4)$$

式 (2-4) 是静水压强分布规律的另一表达式。它表明，在静止的液体中，位置高度 z 愈大，静水压强愈小；位置高度 z 愈小，静水压强愈大。

式 (2-4) 还表明，在均质 ($\gamma = \text{常数}$)、连通的液体中，水平面 ($z_1 = z_2 = \text{常数}$) 必然是等压面 ($p_1 = p_2 = \text{常数}$)，这就是通常所说的连通器原理。

静水压强基本公式同样也反映其它液体在静止状态下的规律，其区别只在于容重 γ 的不同。几种常见的液体和空气的容重 γ 见表 2-1。

表 2-1

常见流体容重

流 体 名 称	温 度 (°C)	容 重	
		千牛/米 ³	公斤力/米 ³
蒸 馏 水	4	9.8	1000
普 通 汽 油	15	6.57~7.35	670~750
酒 精	15	7.74~7.84	790~800
水 银	0	133.3	13600
润 滑 油	15	8.72~9.02	890~920
空 气	20	0.0188	1.205

水利工程中计算静水压强时,通常不考虑作用于水面上大气压强(因大气压均匀地作用于建筑物的表面,例如闸门两侧都受有大气压作用,它们自相平衡),只计算超过大气压的压强数值。若令 p_a 表示大气压强,这样,当表面压强为大气压即 $p_0=p_a$ 时,静水压强可写为

$$p = \gamma h \quad (2-5)$$

下面举例说明静水压强的计算。

例2-1 求水库中水深为5米、10米处的静水压强。

解 已知水库表面压强为大气压强,水的容重 $\gamma = 9.80$ 千牛/米³,

水深为5米处 $p = \gamma h = 9.80 \times 5 = 49$ 千帕

水深为10米处 $p = \gamma h = 9.80 \times 10 = 98$ 千帕

换算成工程单位 1吨力/米² = 9.8千帕 或 1千帕 = 0.102吨力/米²

则水深5米处 $p = 49 \times 0.102 = 5$ 吨力/米²

水深为10米处 $p = 98 \times 0.102 = 10$ 吨力/米²

例2-2 有清水和水银两种液体,求深度各为1米处的静水压强。已知液面为大气压作用,且水银容重 $\gamma_{\text{水银}} = 133.3$ 千牛/米³。

解

水中深为1米处的静水压强 $p = \gamma h = 9.80 \times 1 = 9.80$ 千帕

换算成工程单位 $p = 9.80 \times 0.102 = 1$ 吨力/米²

水银中深为1米处的静水压强 $p = \gamma_{\text{水银}} h = 133.3 \times 1 = 133.3$ 千帕

换算成工程单位 $p = 133.3 \times 0.102 = 13.6$ 吨力/米²

二、静水压强基本方程的意义

静水压强基本方程是水静力学的基本方程式。必须深刻理解它的含义,熟练掌握其运算方法。今分别从几何角度和能量观点说明如下。

(一) 静水压强基本方程的几何意义

图2-6的容器中,若在位置高度为 z_1 和 z_2 的边壁上开小孔,孔口处连接一垂直向上的开口玻璃管,通称测压管,可发现各测压管中均有水柱升起。测压管液面上为大气压,根据连通器原理,则

$$p_1 = \gamma h_{\text{测}1} \quad p_2 = \gamma h_{\text{测}2}$$

因此
$$h_{\text{测}1} = \frac{p_1}{\gamma} \quad h_{\text{测}2} = \frac{p_2}{\gamma}$$

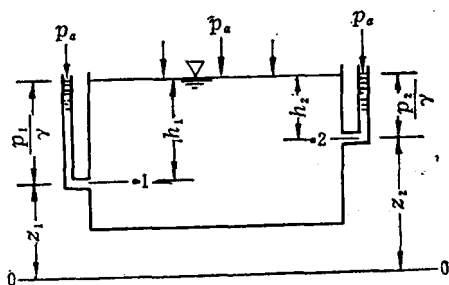


图 2-6

测压管中水面上升高度说明静水中各点压强的大小。通常,称 $h_{\text{测}} = p/\gamma$ 为压强水头或测压管高度。这说明当液体的容重为一定值时,一定的液柱高 h 就相当于确定的静水压强值。

在水力学中,常把某点的位置高度和压强水头之和($z + \frac{p}{\gamma}$)叫做该点的测压管水头,