

中等专业学校教材



# 水力学

(第三版)

陕西省水利学校 李序量 主编



### 第三版前言

本书是在1984年7月出版的中等专业学校通用教材《水力学》的基础上,广泛征集各校在使用该教材中的意见修订而成。

根据水利部水利电力类中等专业学校教学研究会的意见,本书增加了“渗流”一章,将第二版中各章的思考题并入即将出版的《水力学习题集》一书。

参加本书修订工作的有:黄河水利学校邵平江(第二、四、十一、十二章),湖南水利电力学校徐焕文(第一、三、五、十章),陕西省水利学校李序量(第六、七、八、九章)。由李序量主编,东北水利水电专科学校刘翰湘主审。

在本书修订过程中,江西水校孙道宗、湖南水电校周锡民以及各兄弟学校的水力学老师们,通过各种形式,提出了许多宝贵意见,在此,谨致谢意。

最后,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

1990年12月

## 第一版前言

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

## 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

# 目 录

第三版前言

第一版前言

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 .....                | 6   |
| 第一节 静水压强及其特性 .....            | 6   |
| 第二节 静水压强的基本规律 .....           | 8   |
| 第三节 静水压强的表示方法及量测 .....        | 11  |
| 第四节 静水压强分布图 .....             | 14  |
| 第五节 作用在平面壁上的静水总压力 .....       | 15  |
| 第六节 作用在曲面壁上的静水总压力 .....       | 20  |
| 第七节 重力和惯性力同时作用下液体相对平衡举例 ..... | 24  |
| 第三章 水流运动的基本原理 .....           | 30  |
| 第一节 水流运动的基本概念 .....           | 30  |
| 第二节 恒定流的连续性原理 .....           | 35  |
| 第三节 恒定流的能量原理 .....            | 36  |
| 第四节 能量方程应用举例 .....            | 45  |
| 第五节 恒定流的动量原理 .....            | 49  |
| 第四章 水流型态和水头损失 .....           | 58  |
| 第一节 液体的粘滞性 .....              | 58  |
| 第二节 运动液体的两种基本流态 .....         | 59  |
| 第三节 紊流运动 .....                | 63  |
| 第四节 水头损失及其分类 .....            | 66  |
| 第五节 沿程水头损失的分析和计算 .....        | 67  |
| 第六节 局部水头损失的分析和计算 .....        | 76  |
| 第五章 管流 .....                  | 84  |
| 第一节 概述 .....                  | 84  |
| 第二节 短管的水力计算 .....             | 85  |
| 第三节 长管的水力计算 .....             | 91  |
| 第四节 管流水力计算举例 .....            | 95  |
| 第五节 压力管中的水击简介 .....           | 100 |
| 第六章 明渠均匀流 .....               | 109 |

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| 第一节    | 概述 .....                  | 109 |
| 第二节    | 明渠均匀流的基本特性与发生条件 .....     | 112 |
| 第三节    | 明渠均匀流的基本公式 .....          | 113 |
| 第四节    | 渠道的水力计算 .....             | 115 |
| 第五节    | 渠道水力计算中的几个问题 .....        | 120 |
| 第七章    | 明渠非均匀流 .....              | 125 |
| 第一节    | 概述 .....                  | 125 |
| 第二节    | 明渠非均匀流的一些基本概念 .....       | 126 |
| 第三节    | 水跌与水跃 .....               | 131 |
| 第四节    | 棱柱体渠道非均匀渐变流水面曲线定性分析 ..... | 137 |
| 第五节    | 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算与绘制 .....  | 148 |
| 第六节    | 天然河道水面曲线的计算 .....         | 153 |
| 第七节    | 弯曲河段的水流简介 .....           | 157 |
| 第八章    | 孔流与堰流 .....               | 162 |
| 第一节    | 概述 .....                  | 162 |
| 第二节    | 孔口与管嘴出流 .....             | 163 |
| 第三节    | 堰流 .....                  | 167 |
| 第四节    | 闸孔出流 .....                | 182 |
| 第九章    | 泄水建筑物上、下游水流衔接与消能 .....    | 191 |
| 第一节    | 概述 .....                  | 191 |
| 第二节    | 底流式衔接与消能 .....            | 192 |
| 第三节    | 挑流消能的水力计算 .....           | 202 |
| 第十章    | 渗流 .....                  | 208 |
| 第一节    | 渗流的基本概念 .....             | 208 |
| 第二节    | 渗流的基本定律 .....             | 210 |
| 第三节    | 地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流 ..... | 212 |
| 第四节    | 棱柱体地下河槽中恒定渐变渗流的浸润曲线 ..... | 214 |
| 第五节    | 普通井及井群的计算 .....           | 218 |
| 第十一章   | 高速水流简介 .....              | 223 |
| 第一节    | 高速水流的脉动压强 .....           | 223 |
| 第二节    | 高速明流的掺气 .....             | 225 |
| 第三节    | 空穴与空蚀 .....               | 228 |
| 第四节    | 明槽急流冲击波现象 .....           | 232 |
| 第十二章   | 水力学模型试验基础 .....           | 235 |
| 第一节    | 概述 .....                  | 235 |
| 第二节    | 水流的相似原理和相似准则 .....        | 237 |
| 第三节    | 模型设计与算例 .....             | 242 |
| 附录 I   | 谢才系数 $C$ 值表 .....         | 247 |
| 附录 II  | 梯形断面渠道均匀流水深求解图 .....      | 248 |
| 附录 III | 梯形、矩形、圆形断面临界水深求解图 .....   | 249 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 附录IV 断面特性 $F$ 的计算图 .....         | 250 |
| 附录V 矩形断面渠道收缩断面水深及水跃共轭水深求解图 ..... | 252 |
| 附录VI 习题答案 .....                  | 253 |
| 参考文献 .....                       | 258 |

# 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，逐渐形成了一门专门研究液体静止和运动规律，探讨液体与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学科，这门学科就是水力学。

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状态下的力学规律。水动力学研究作用于液体上的各种力和运动之间的关系以及液体的运动特性及能量转换等问题。

水力学在水利、机械、冶金、化工、石油及建筑等工程中应用广泛，特别是在水利水电工程的勘测、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（见图 1-1），通常包括坝、闸、电站、管道及渠道等主要水工建筑物。它们都有各自不同的水力学问题。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。如计算坝身、闸门、闸身、管壁上的静水作用力和动水作用力。
- 2) 水工建筑物的过水能力问题。如确定管道、渠道、闸孔和溢流堰的过水能力。
- 3) 水流通过水工建筑物时的能量损失问题。如确定水流通过水电站、抽水站、管道、渠道时引起的能量损失的大小，以及计算溢流坝、溢洪道、水闸和跌水下游的消能。
- 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。
- 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和对工程的影响等。

以上这些问题，彼此不是孤立的，也不是水力学的全部问题。譬如，还有渗流、挟沙水流、高速水流、波浪运动以及水力学模型试验等其它一些水力学问题。

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，才能正确解决水力分析和水力计算的问题。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而奋斗。

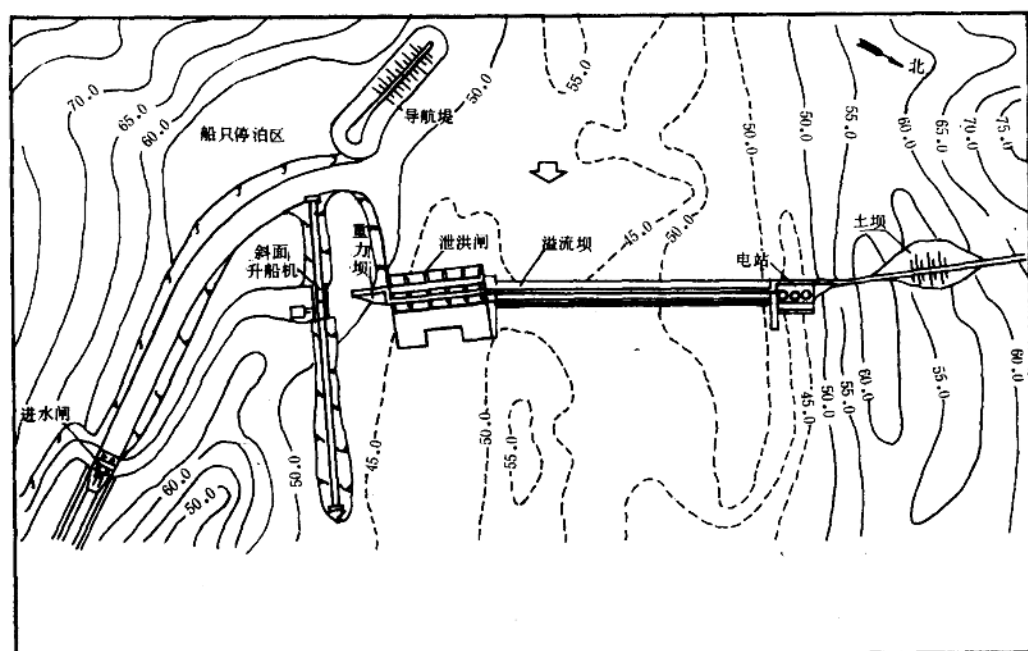


图 1-1

## 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液体运动的规律，并应用这些规律解决实际问题。它研究的对象是液体。液体的运动规律，一方面与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。

### 一、液体的基本特性

自然界的物质有**固体**、**液体**和**气体**三种存在形式。液体和气体统称**流体**。流体和固体的主要区别在于：固体有一定的形状；而流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和拉伸变形，静止时不能承受切力和剪切变形），即液体具有**易流动性**。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组成的，分子与分子之间具有空隙。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的液体分子组成的实体**。这样，就可以把液体当作由无数液体质点所组成的

没有空隙的连续介质，而且可以把这种连续介质看作均质的和各向同性的。即它的各个部分和各个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，液体的基本特性是易于流动、不易压缩、均质等向的连续介质。以水为代表的一般液体，都具有这些基本特性。

## 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。当液体受到某种作用力而改变其原有运动状态时，所遇到的液体对这种作用力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。

对均质液体，其质量大小可以用密度来表示。

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

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

在国际单位制 (SI) 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<sup>3</sup> (kg/m<sup>3</sup>)。在一个标准大气压 (1atm $\approx$ 0.1MPa) 下温度为 4℃ 时，水的密度为 1000kg/m<sup>3</sup>。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 9.80m/s<sup>2</sup>。

对均质液体，其重力大小可以用容重来表示。

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

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

容重的单位为牛顿/米<sup>3</sup> (N/m<sup>3</sup>)。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℃ 时为

$$\gamma = \rho g = 1000 \text{kg/m}^3 \times 9.8 \text{m/s}^2 = 9800 \text{N/m}^3$$

例 1-1 求在一个大气压下, 4℃ 时, 一升水的重量和质量。

解 已知体积  $V = 1 \text{L} = 0.001 \text{m}^3$

水的容重为  $\gamma = 9800 \text{N/m}^3$ , 于是可得一升水的重量为

$$G = \gamma V = 9800 \text{N/m}^3 \times 0.001 \text{m}^3 = 9.80 \text{N}$$

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

$$m = \rho V = 1000 \text{kg/m}^3 \times 0.001 \text{m}^3 = 1 \text{kg}$$

### (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 1-2, 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贴附于壁面上不动, 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 1-2, 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

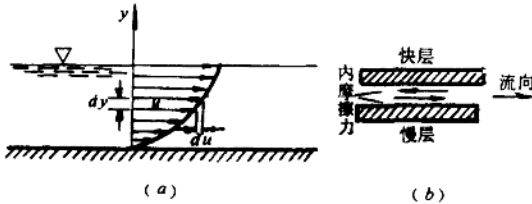


图 1-2

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 1-2 (b) 所示。快层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。

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

液体受压后体积缩小的性质称为液体的压缩性。液体也具有弹性, 即当除去外力作用后可以恢复原状的性质。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  $\beta$  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 Pa。

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

液体自由面由于水分子及空气分子间的引力不平衡，使自由面能承受微弱拉力的性质，称为表面张力特性。通常表面张力数值很小，仅在水的表面为曲率很大的曲面时，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，惯性、万有引力特性和粘滞性对液体运动的影响最大。

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做理想液体，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。提出理想液体这一概念，可以作为分析实际液体运动的台阶，同时理想液体的规律也可近似地反映粘滞性作用不大的实际液体流动的情况。

## 习 题

1-1 500L 的水在一个大气压下  $4^{\circ}\text{C}$  时，它的重量和质量各有多大？

1-2 已知海水的容重为  $10000\text{N/m}^3$ ，若以  $\text{N/L}$ ，及  $\text{N/cm}^3$  来表示，其容重各为多少？

1-3 酒精的容重为  $8000\text{N/m}^3$ ，它的密度应为多少？

## 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）以及水体内部质点之间都有压力的作用。

水处于静止状态时的压力叫静水压力，水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

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

式中  $P$ ——静止液体作用于某受压面上总的力，叫静水总压力，N；

$A$ ——受力面积， $\text{m}^2$ ；

$p$ ——静水压强，Pa。

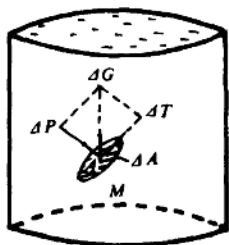


图 2-1

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  $M$ ，以  $M$  点为中心，围绕它任取一倾斜的微小面积  $\Delta A$ ， $\Delta A$  上作用的静水总压力为  $\Delta P$ ，这样，作用于微小面积上的平均静水压强为

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

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

$$p_M = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

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，它们的单位也是不同的。静水总压力的单位是牛顿（N）；静水压强的单位是帕斯卡（Pa）。

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。

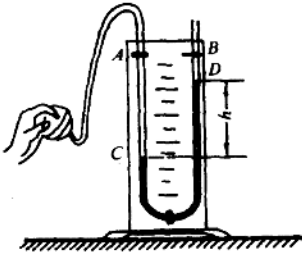


图 2-2

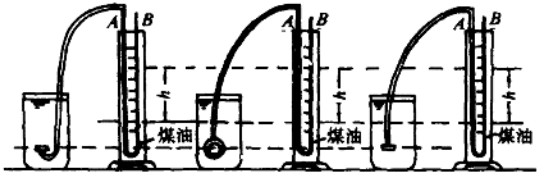


图 2-3

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，静止水体又不可能抵抗拉力，只能承受垂直并指向作用面的压力。也就是说，静水压强的方向永远垂直并指向作用面。

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。

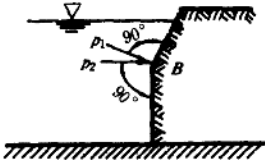


图 2-4

## 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。

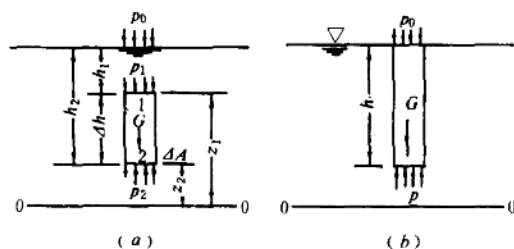


图 2-5

进一步分析作用在这一小水柱上的力:

- 1) 小水柱的自重(即重力),  $G = \gamma \Delta h \Delta A$ , 方向铅直向下;
- 2) 由于  $\Delta A$  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  $p_1 \Delta A$ , 方向铅直向下;
- 3) 同理,作用于小水柱底面上的总压力为  $p_2 \Delta A$ , 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

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

等式两端除以  $\Delta A$ , 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  $\Delta h$  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 1m 深度,静水压强就增大  $\gamma \Delta h = 9.8 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} = 9.8 \text{ kN/m}^2$ 。

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, 在静止液体中, 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  $z$ , 则可把公式  $p_2 - p_1 = \gamma \Delta h$  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 
$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \tag{2-4}$$

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  $\gamma$  的不同。几种常见的液体和空气的容重  $\gamma$  见表 2-1。

表 2-1 常见流体容重

| 流 体 名 称 | 温 度<br>(℃) | 容 重               | 流 体 名 称 | 温 度<br>(℃) | 容 重               |
|---------|------------|-------------------|---------|------------|-------------------|
|         |            | kN/m <sup>3</sup> |         |            | kN/m <sup>3</sup> |
| 蒸 馏 水   | 4          | 9.8               | 水 银     | 0          | 133.3             |
| 普 通 汽 油 | 15         | 6.57~7.35         | 润 滑 油   | 15         | 8.72~9.02         |
| 酒 精     | 15         | 7.74~7.84         | 空 气     | 20         | 0.0188            |

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

$$p = \gamma h \tag{2-5}$$

下面举例说明静水压强的计算。

例 2-1 求水库中水深为 5m、10m 处的静水压强。

解 已知水库表面压强为大气压强, 水的容重  $\gamma = 9.80 \text{ kN/m}^3$ 。

水深为 5m 处  $p = \gamma h = 9.80 \times 5 = 49 \text{ kPa}$

水深为 10m 处  $p = \gamma h = 9.80 \times 10 = 98 \text{ kPa}$

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

解

水中深为 1m 处的静水压强  $p = \gamma h = 9.80 \times 1 = 9.80 \text{ kPa}$

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

## 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。

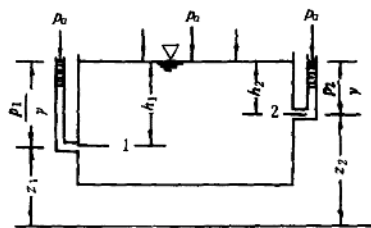


图 2-6

### (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

$$p_1 = \gamma h_{m1} \quad p_2 = \gamma h_{m2}$$

因此

$$h_{m1} = \frac{p_1}{\gamma} \quad h_{m2} = \frac{p_2}{\gamma}$$

显然，在均质连通的容器内， $\gamma$  为定值，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  $h_m = p/\gamma$  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  $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$  叫做该点的测压管水头，用  $H_p$  表示。因此，式 (2-4) 表明：处于静止状态的水中，各点的测压管水头  $H_p$  为一常数。即处于静止状态的水中，各点的位置高度和压强水头之和为一常数

$$H_p = z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (2-6)$$

常数  $C$  的大小随基准面的位置而变，所选基准面一定，则常数  $C$  的值也就确定了。

连接各点测压管中水面的线，称为测压管水头线。因此，静水压强基本方程式从几何上表明：静止状态的水仅受重力作用时，其测压管水头线必为水平线。

### (二) 静水压强基本方程的物理意义

由物理学知：质量为  $m$  的物体在高度  $z$  的位置具有位置势能（简称位能） $mgz$ ，它反映物体在重力作用下，下落至基准面 0—0 时重力做功的本领。对于液体，它不仅具有位置势能，而且液体内部的压力也有做功的本领，如在图 2-6 的点 1 处设置测压管，则测压管水面上升  $h_m = \frac{p_1}{\gamma}$ ，这表明液体水面上升是压力作用的结果。它与位置势能相似，水力学中把它叫做压力势能，简称压能，质量为  $m$  的质点所具有的压能为  $mg \frac{p_1}{\gamma}$ 。

因此，静水中质点 1 所具有的全部势能，其数值应为位置势能与压力势能之和，即

$$mgz_1 + mg \frac{p_1}{\gamma} = mg \left( z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right)$$

一般在研究时常用单位重量水体所具有的势能即单位势能的概念，单位势能以  $E_p$  表示，即