

高等学校试用教材

水力学

武汉水利电力学院
华东水利学院 编

人民教育出版社

11-111111

本书是根据教育部《高等水利工程专业本科教育培养方案》和《高等水利工程专业课程教学大纲》的要求，结合编者多年从事水利工程专业课程的教学和教材编写工作的经验编写而成的。本书可作为高等院校水利工程专业及相关专业的教材，也可供从事水利工作的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

水 力 学

武汉水利电力学院 编
华东水利学院

主 编

副 主 编

参 编

校 审

校 对

本书是根据教育部《高等水利工程专业本科教育培养方案》和《高等水利工程专业课程教学大纲》的要求，结合编者多年从事水利工程专业课程的教学和教材编写工作的经验编写而成的。本书可作为高等院校水利工程专业及相关专业的教材，也可供从事水利工作的工程技术人员参考。

人 民 教 育 出 版 社

（北京）

内 容 提 要

本书是为高等学校工科水电站动力设备专业编写的《水力学》试用教材。全书共分十一章,内容包括绪论,水静力学,液体动力学理论基础,液流型态和水头损失,有压管道恒定流和孔口、管嘴出流,管道非恒定流,明渠水流和堰流,理想液体旋涡运动,理想液体平面无旋运动,实际液体运动微分方程及绕流阻力,相似原理等。

本书亦可作为有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员参考。

高等学校试用教材

水 力 学

武汉水利电力学院 编
华东水利学院

*

人民教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

浙江黄岩印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 26 插页 1 字数 590,000

1979年12月第1版 1981年4月第2次印刷

印数 7,701—9,200

书号 15012·0219 定价 2.15 元

前 言

本书是为高等学校工科水电站动力设备专业编写的《水力学》试用教材，亦可供有关专业和工程技术人员参考。

本书由武汉水利电力学院水力学教研室和华东水利学院水力学教研室合编。共十一章。前五章由武汉水利电力学院刘忠潮、许承宜编写，李荃花选编习题；后六章由华东水利学院刘润生、马法三编写。

本书由清华大学、华中工学院主审。参加审稿的还有西北农学院、成都科学技术大学、华北水利水电学院等单位。参加审稿的同志对本书提出了许多宝贵的意见和建议，我们谨在此表示感谢。

由于编者水平所限，本书缺点和错误在所难免，诚恳欢迎读者批评和指正。

编 者

一九七九年八月

目 录

第一章 绪 论1

- § 1-1 水力学的定义及其在水电站动力设备专业中的任务1
- § 1-2 液体的基本特征及连续介质的概念1
- § 1-3 液体的主要物理性质2
- § 1-4 作用于液体的力7

第二章 水静力学8

- § 2-1 静水压强及其特性8
- § 2-2 重力作用下的液体平衡9
- § 2-3 绝对压强、相对压强、真空、水头、势能12
- § 2-4 测量液体压强的原理和装置15
- § 2-5 液体平衡的微分方程19
- § 2-6 绕定轴等速旋转容器中的液体平衡22
- § 2-7 静水压强分布图24
- § 2-8 作用在平面上的静水总压力25
- § 2-9 作用在曲面上的静水总压力29
- § 2-10 巴斯加定律32
- 习题33

第三章 液体动力学理论基础36

- § 3-1 研究液体运动的两种基本方法36
- § 3-2 恒定流和非恒定流, 流线、元流和总流38
- § 3-3 三元流、二元流、一元流和一元流动法41
- § 3-4 液体运动的连续性方程42
- § 3-5 理想液体的运动方程44
- § 3-6 实际液体元流的能量方程49
- § 3-7 实际液体总流的能量方程54
- § 3-8 实际液体总流的动量方程65
- § 3-9 气穴和气蚀70
- 习题71

第四章 液流型态和水头损失76

- § 4-1 水力阻力和水头损失76

§ 4-2 层流和紊流77

- § 4-3 均匀流沿程水头损失与水力阻力的关系80
- § 4-4 液体的层流运动83
- § 4-5 液体的紊流运动88
- § 4-6 紊流沿程水头损失的研究和计算98
- § 4-7 计算沿程水头损失的经验公式108
- § 4-8 实际液流的边界层115
- § 4-9 局部水头损失118
- 习题126

第五章 有压管道恒定流和孔口、管嘴

出流128

- § 5-1 简单管道水力计算的基本公式128
- § 5-2 水泵装置及虹吸管的水力计算138
- § 5-3 复杂管道的水力计算144
- § 5-4 管网的计算原理及方法147
- § 5-5 孔口出流151
- § 5-6 管嘴出流154
- 习题158

第六章 有压管道非恒定流162

- § 6-1 水击现象及分类162
- § 6-2 水击波速167
- § 6-3 水击基本方程及其解法简介169
- § 6-4 水击的数解法176
- § 6-5 水击的图解法185
- § 6-6 水击计算的特征线法187
- § 6-7 减小水击压强的措施199
- § 6-8 调压井的水力现象及基本方程201
- 习题205

第七章 明渠水流和堰流207

- § 7-1 明渠的几何特性207
- § 7-2 明渠均匀流210
- § 7-3 缓流和急流, 缓坡和陡坡215
- § 7-4 水跃227
- § 7-5 明渠非均匀渐变流230
- § 7-6 明渠非恒定流239

§ 7-7 堰流.....	242	§ 9-10 绕翼栅流动简介.....	322
习题.....	248	习题.....	327
第八章 理想流体的旋涡运动	251	第十章 实际流体的运动微分方程与绕流	
§ 8-1 流体微团运动形式分析.....	251	阻力	330
§ 8-2 流体微团的有旋运动.....	257	§ 10-1 实际流体的纳维-斯托克斯方程.....	330
§ 8-3 涡线, 涡管和旋涡强度.....	259	§ 10-2 边界层及其厚度.....	336
§ 8-4 速度环量, 斯托克斯定理.....	260	§ 10-3 普朗特边界层基本方程.....	339
§ 8-5 旋涡场的性质.....	267	§ 10-4 边界层分离现象.....	342
§ 8-6 平面圆形旋涡.....	273	§ 10-5 绕流阻力.....	345
§ 8-7 旋涡的诱导速度.....	276	§ 10-6 卡门边界层动量积分关系式及其	
§ 8-8 间断面, 旋涡的形成.....	280	应用.....	348
习题.....	284	§ 10-7 光滑平板紊流边界层计算.....	356
第九章 理想不可压缩流体恒定平面无旋		§ 10-8 实际流体紊流雷诺方程.....	360
运动	287	习题.....	365
§ 9-1 无旋运动和速度势.....	287	第十一章 相似原理和水流量测	368
§ 9-2 基本方程组, 初始条件和边界		§ 11-1 相似原理和相似判据.....	368
条件.....	291	§ 11-2 因次分析.....	380
§ 9-3 平面运动及流函数.....	294	§ 11-3 水流量测.....	394
§ 9-4 平面无旋运动和流网.....	296	习题.....	406
§ 9-5 简单势流.....	300	附录 I 有关矢量运算的公式	408
§ 9-6 简单势流的叠加.....	303		
§ 9-7 绕无穷长圆柱的流动.....	309		
§ 9-8 卡门涡街与涡振.....	317		
§ 9-9 环量 Γ 的确定, 儒可夫斯基-恰普			
雷金假定.....	319		

第一章 绪 论

§ 1-1 水力学的定义及其在水电站动力设备专业中的任务

水力学是研究液体机械运动规律及其在生产实践中应用的一门科学。它研究的主要对象是以水为代表的液体,故通常称为水力学。但水力学的基本理论不仅适用于水,也适用于各种液体和可忽略压缩性影响的气体。

水力学是水利工程、城市建设、机械制造、船舶设计、石油开采、金属冶炼、化学工业等所需应用的理论基础之一。对水电站动力设备专业来说,水力学是主要技术基础课之一。例如,设计水电站的水工建筑物、研究水轮机的工作过程,分析水轮机中的气蚀现象和进行水轮机的水力模型试验等,都必须以水力学作为理论基础;又如水电站在运行过程中,水轮机的工作负荷发生突然变化时,在压力水管和水轮机过水系统中会产生水击现象,水力学中所研究的水击理论,为设计减弱水击的工程措施和进行水轮机的调节保证计算,提供必要的理论依据;其他,如设计水电站的技术供水、供油、供气管道系统和水力量测设备等,也必须运用水力学的基本原理。所以,学习和研究水力学对从事水电站工作的工程技术人员来说是十分重要的。

§ 1-2 液体的基本特征及连续介质的概念

一、液体的基本特征

液体的性状介于气体与固体之间。一方面,液体象固体一样能保持一定体积,很不容易被压缩;而另一方面,液体又与气体一样,没有固体那种保持自身形状的能力,具有易流动性。这是液体与气体区别于固体的基本特征。依据液体与气体都具有易流动性这一宏观表象,又将二者统称为流体。

从力学角度来看,流体与固体的区别,在于它们所能承受的应力状态不同。流体几乎不能承受拉应力,只能抵抗压应力。而在微小的切应力作用下,流体便很容易不断发生变形或流动,说明流体不能在切应力作用下维持平衡,或者说只要有切应力存在(不管多么微小),流体就不会静止下来。固体却不同,它不仅能承受一定的拉应力和压应力,即使在一定限度的切应力作用下,它也能形成平衡。显然,流体不能在切应力作用下平衡的性质,与固体有着根本的区别。

液体与气体虽同属于流体,但也不完全相同。液体很不容易被压缩。当容器的体积大于它的体积的时候,它不能充满容器,而会形成一个自由液面。气体很容易被压缩,没有固定的体积,能够充满任何容器,不存在自由表面。

二、连续介质的概念

由物理学可知,液体与其他物质一样,是由彼此之间有空隙的大量分子组成的,而且这些分

子永恒不息地进行着复杂的微观运动,即使一般所谓静止液体,其分子也处于不停的运动中。但水力学不研究微观的分子运动,而是从宏观的角度来研究液体的机械运动,因此,在水力学中,常将液体视为连续介质,即把液体看作由完全充满所占空间的,内部无任何空隙的无数液体质点所组成的连续体。这样,我们就可运用数学中的连续函数作为分析水力学问题的有效工具。

连续介质的假设,在水力学中被广泛地应用着,并由实践证明,根据这个假设所作的分析对工程来说,是足够精确的。这是因为,分子空隙间的距离与我们研究的水流尺度比较起来是微乎其微的。但当研究的区域很小,与分子大小处于同一数量级时,或者在很稀薄的气体中,连续介质的假设就不再合适,而必须考虑为不连续体;另外,当液体性质有局部突变时,连续介质的假设也不合适,例如液流中局部地区的压强很低,发生气化现象形成气穴时,就会破坏液体的连续性。

§ 1-3 液体的主要物理性质

液体的物理性质是决定液体平衡和运动的内部因素。在此,只讲几种主要的、与液体平衡和运动规律直接有关的物理性质。

一、液体的密度与重率

与自然界其他物体一样,液体具有质量。均质液体的质量 M 与体积 V 的比值,即液体单位体积内所具有的质量,叫做密度 ρ ,故

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

对于非均质液体,根据连续介质的假设,则

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}$$

在国际单位制中,密度的单位为公斤/米³(kg/m³)。

液体处于重力场中,会受到地球对它的引力,说明液体具有重量。若液体的质量为 M ,重力加速度为 g ,则重量为

$$G = Mg \quad (1-2)$$

单位体积内液体所具有的重量,叫做重率 γ 。对于均质液体,若其体积为 V ,重量为 G ,则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

对于非均质液体,根据连续介质的假设,则

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V}$$

重率的国际单位为牛顿/米³(N/m³)或千牛顿/米³(kN/m³)。

将式(1-2)的两边同除以体积 V ,可得密度与重率的关系式:

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中重力加速度 g 通常可看作常数,其常用数值为9.80米/秒²(m/s²)。

不同的液体,其密度和重率是不同的。同种液体的密度和重率又随温度和压力而变化,但变化微小,一般可看作常数。水在不同温度时的重率和密度,见表1-1。

表1-1 标准大气压下,不同温度时的密度和重率

$t/^{\circ}\text{C}$	0	4	10	20	40	60	80	100
$\gamma(\text{N/m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.54	9782.95	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77
$\rho(\text{kg/m}^3)$	999.87	1000	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.05

在工程上一般认为水的 γ 和 ρ 不变,常取 $\gamma=9800\text{N/m}^3$ 和 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 作为计算值。

其他几种常见的液体及空气的重率 γ 值见表1-2。

表1-2

液体种类	水 银	油	汽 油	酒 精	空 气
$\gamma(\text{N/m}^3)$	133280	8820	7350	7750	12.66

二、液体的压缩性

液体的体积随压强的增大而减小(也就是重率和密度随压强的增大而加大),这种性质叫做压缩性。液体压缩性的大小,一般是用体积压缩系数 β 来表示。 β 是液体体积的相对压缩值 $\frac{dV}{V}$ 与压强增值 dp 的比值,即

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

式中加一负号的原因是:压强增加(即 dp 为正值),体积被压缩(即 dV 为负值),两者符号相反,要使 β 以正数表达,式(1-5)就应加一负号。

由于体积随压强增大而减小,同时还伴随着密度的增加,所以式(1-5)又可写为

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-6)$$

β 的倒数叫做体积弹性系数 K ,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-7)$$

β 的单位为 $\text{米}^2/\text{牛顿}(\text{m}^2/\text{N})$, K 的单位为 $\text{牛顿}/\text{米}^2(\text{N}/\text{m}^2)$ 。

β 和 K 都是液体压缩性的度量。显然, K 值越大或 β 值越小,说明液体越不易压缩。液体种类不同,其 β 和 K 值也就不一样。同一种液体的 β 和 K 值也随温度和压强而变化,但变化不大,一般可看作常数。

水的 K 值一般可取用 $20.2 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 。当压强每增加一个大气压,水的体积大致只减小十万分之五,即

$$-\frac{dV}{V} = \beta dp = \frac{1}{K} dp = \frac{9.8 \times 10^4}{20.2 \times 10^8} \approx 5 \times 10^{-5}$$

可见,以水为代表的一般液体,其压缩性是很小的,故一般可忽略。

对于气体来说,在一般情况下,其压缩性是不能忽略的,故常称气体为可压缩流体。但在某些工程实际中,如水电站厂内气系统中的气体,由于温度和压强变化不很大,由此所引起体积的变化也很小,故常可当作不可压缩流体来处理。本课程主要讨论以水为代表的不可压缩液体的运动规律,自然,也适用于可忽略压缩性影响的气体。

但需注意,水力学中的某些特殊问题,如水击现象等,由于压强变化很大,就必须考虑水体的压缩性,不然就会导致很大的误差。

三、液体的粘滞性

液体内部抗拒各液层之间作相对运动的内摩擦性质,叫做粘滞性。

图 1-1 是当液体沿某一固定平直边界流动时,位于边界法线 y 上各点的流速分布情况。图中箭头代表各点流速的方向,线段长度代表点流速的大小。显然,靠近边界上由于分子附着力的作用,液体流速等于零,离边界越远,则流速 u 越大。此时,若将液流看成许多无限薄液层作平行于边界的直线运动,则显然各液层流速彼此不等,如图 1-1 所示。

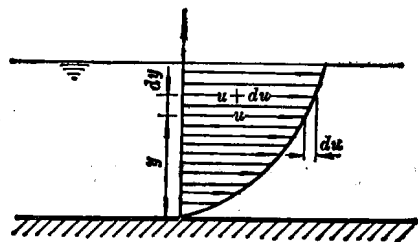


图 1-1

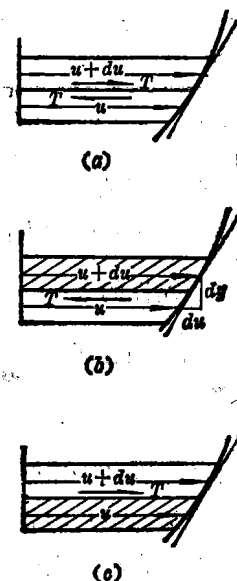


图 1-2

实验证明,液层间有相对运动时,则在任意两液层的接触面上将产生一对等值反向的力,这一对力称为内摩擦力或切力,如图 1-2a 所示。若两液层中流动快的液层的流速为 $u+du$ 。流动慢的液层的流速为 u ,则两液层间内摩擦力的方向是:对流动快的液层来说,流动慢的液层作用于它的内摩擦力,与运动方向相反,见图 1-2b,其作用是阻滞流动快的液层的运动;对流动慢的液层而言,流动快的液层作用于它的内摩擦力,与运动方向一致,见图 1-2c,其作用是带动流动慢的液层的运动。可见内摩擦力的作用是阻抗液层间的相对运动。

为了进一步分析,我们可在水流内部取两液层间的一个矩形水质点 $ABCD$ 来研究。见图 1-3,由于上层液体流动较快,下层液体流动较慢,伴随液层间的相对运动,原来呈矩形的液体质点 $ABCD$,经 dt 时间

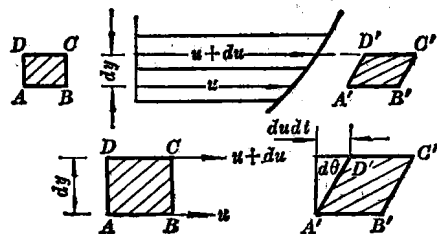


图 1-3

移动到新的位置并变形为平行四边形 $A'B'C'D'$ 。这时质点的剪切变形为 $d\theta$,若 dt 时间内 $d\theta$ 不

大, 则 $d\theta \approx \operatorname{tg} d\theta$ 。于是剪切变形为

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

而单位时间的剪切变形为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知 $\frac{du}{dy}$ 表示液体质点的剪切变形速度, 通常称为流速梯度。

由牛顿首先提出, 并经实验证明: 液层间的内摩擦力(或切力) T 的大小与接触面 S 和流速梯度成正比, 与液体的性质有关而与压力无关, 即

$$T = \mu S \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式(1-9)为液体内摩擦定律的表达式, 亦称为牛顿内摩擦定律。以面积 S 除上式两端, 得单位面积上的内摩擦力, 即切应力:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式(1-9)和(1-10)中的 μ 为比例系数, 称为动力粘滞系数。 μ 的物理意义是当流速梯度等于1时两液层间的切应力。由式(1-10)可导出 μ 的国际单位为牛顿·秒/米² (N·s/m²); 而在物理学上惯用的单位为达因·秒/厘米² (dyn·s/cm²), 又叫泊(P)。1泊相当于0.1牛顿·秒/米² (0.1 N·s/m²)。

液体的动力粘滞系数 μ 与密度 ρ 的比值, 叫运动粘滞系数 ν , 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

运动粘滞系数 ν 常用单位为米²/秒 (m²/s) 或厘米²/秒 (cm²/s)。

μ 和 ν 都是液体粘滞性的度量, 其数值越大说明液体的粘滞性作用越强。 μ 和 ν 的大小与液体的性质和温度有关, 而与压力关系很小(一般可忽略)。常用的水的运动粘滞系数, 可查表1-3。

从式(1-9)和(1-10)可知, 当 $\frac{du}{dy} = 0$, 即液体处于静止状态(各液层间无相对运动)时, 则 $T = 0$ 或 $\tau = 0$ 。这说明液体处于静止状态时, 不呈现内摩擦力或切应力。

式(1-10)反映液体受切力后会产生流动变形, 流动变形与液体流动的时间长短有关。所以液体所承受的切应力与剪切变形速度(或切应变率)成正比, 而固体的切应力是与剪切变形的大小(或切应变)成正比的。所以液体与固体在力学性质上有明显的区别。

上面所讨论的液体内摩擦定律, 对于以水为代表的一般液体而言, 只适用于液体内部各液层间没有质点掺混的层流运动情况。对于特殊液体, 如悬浮质液体和胶质液体, 上述内摩擦定律是不适用的。

最后应指出, 虽然粘滞性是液体所固有的特性, 但在以后的研究中, 为了使问题简化, 在某些

表 1-3 水的运动粘滞系数 ν (cm^2/s)

$^{\circ}\text{C}$	ν	$^{\circ}\text{C}$	ν	$^{\circ}\text{C}$	ν
0	0.0179	13	0.0120	50	0.00549
1	0.0173	14	0.0117	55	0.00506
2	0.0167	15	0.0114	60	0.00469
3	0.0162	16	0.0111	65	0.00436
4	0.0157	17	0.0108	70	0.00406
5	0.0152	18	0.0106	75	0.00380
6	0.0147	19	0.0103	80	0.00357
7	0.0143	20	0.0100	85	0.00336
8	0.0139	25	0.00894	90	0.00316
9	0.0135	30	0.00801	95	0.00299
10	0.0131	35	0.00723	100	0.00284
11	0.0127	40	0.00660		
12	0.0124	45	0.00599		

情况下,若粘滞性对流动的影响并不显著,则可忽略液体的粘滞性影响。可以忽略粘滞性影响的液体,称为理想液体,不能忽略的,称为粘性液体。即使对于粘滞性影响不能忽略的流动情况,在研究方法上,也常可借助于理想液体概念来探求液体运动的基本规律,然后再通过实验研究方法,将由于略去粘滞性影响所引起的误差加以校正;这不仅大大简化了理论分析过程,而且也不影响精度。当然,实际并不存在“理想液体”,它仅仅是为便于研究液体的运动而引入的一个重要概念。

例题 1-1 设想在长度及宽度都比较大的平板 A 、 B 之间充满油液,如图 1-4 所示,板间距离 $\delta=1\text{mm}$ 。假如下平板 A 固定不动,并以速度 u 拉上平板 B 向右作匀速运动,则发现两平板间的各层油液也将以不同速度向右移动,且呈直线分布。与 A 平板接触的液体速度为零,越向上速度越大,直到与 B 平板接触的液层,其速度与 B 平板相同,都等于 u 。同时发现拉动 B 平板运动的速度 u 越大,则 B 平板所受的阻力越大。如 B 平板运动的速度 $u=1\text{ m/s}$ 。油液的动力粘滞系数 $\mu=0.1\text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$,试求作用在运动平板单位面积上的阻力为多大?

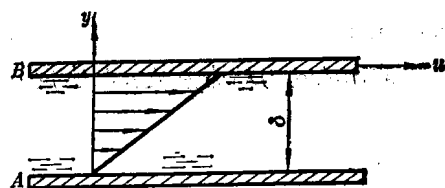


图 1-4

解 两平板间各液层速度不同,说明各液层间将因相对运动而产生内摩擦力。在此题的特殊情况下,由于板间油液运动速度呈直线分布,则流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 便为常数,即各液层间的切应力应相等,该切应力就是作用于运动平板单位面积上的阻力。于是按牛顿内摩擦定律得

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

已知油液的动力粘滞性系数 $\mu=0.01\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。于是

$$\begin{aligned}\tau &= \mu \frac{du}{dy} = 0.01 \frac{1}{0.001} \\ &= 10\text{ N}/\text{m}^2\end{aligned}$$

而 τ 的方向与平板 B 运动速度 u 的方向相反。

四、表面张力

物理学从分子力的观点,对液体的表面张力已作了说明。从宏观上看,液体具有力图缩小其表

面的趋势,可认为沿液体表面作用有张力,叫表面张力。这种表面张力产生在液体与气体相接触的自由表面上,也产生于液体与固体相接触的表面上,或与另一种液体相接触的表面上。

表面张力的大小,可用表面上单位长度所受的张力,即表面张力系数 σ 来表示,常用单位为牛顿/米(N/m)。表面张力系数 σ 的大小随液体的种类和温度而变化,水在20°C时,其 σ 为0.073牛顿/米,可见,表面张力很小,对水电站动力工程所涉及的一般水力现象而言,可以略去不计。

§ 1-4 作用于液体的力

依据不同的物理性质,作用于液体的力可分为惯性力、重力、粘滞力和表面张力等物理力。另外,为便于分析液体的运动或平衡规律,又可根据液体上作用力的表现形式不同而分为质量力和表面力。

一、质量力: 对于被作用的液体来说,如果力的作用反映在液体内部每一个质点上,这样的力便叫质量力,或体积力,如重力、惯性力、离心力等。质量力的大小和液体的质量成正比。单位质量液体上所受的质量力称为单位质量力。设在 x, y, z 直角坐标系中,作用在质量为 M 的液体上的质量力为 F ,则单位质量力为 $\frac{F}{M}$,而 F_x, F_y, F_z 分别为质量力 F 在 x, y, z 轴上的投影,于是单位质量力在各坐标轴上的分力可表示为:

$$X = \frac{F_x}{M}, \quad Y = \frac{F_y}{M}, \quad Z = \frac{F_z}{M}$$

显然,单位质量力的单位应为米/秒²(m/s²),与加速度的单位相同。

二、表面力: 如果力的作用不是反映在液体的每一个质点上,而是反映在外部表面或内部截面上,这样的力便叫做表面力。如作用于液体边界上的大气压力,以及液体内部各部分之间相互作用的压力、内摩擦力等,这些力作用于液体外部或内部截面,其大小和作用面积成正比。

作用于液体的表面力,可分为垂直于作用面的压力和沿作用面的切力两种。



第二章 水静力学

水静力学研究液体处于静止(或平衡)状态下的力学规律, 以及这些规律在工程实际中的应用。它是水力学的一个基础部分。这里所说的静止(或平衡), 是指液体与容器之间以及液体内部各液层之间都没有相对运动的状态。

在水电站设计和运行生产实际中, 会遇到不少水静力学问题, 如水电站快速工作闸门启闭力的确定, 水轮机导叶在关闭状态下所受水压力的计算, 以及常用量测液体压强仪表的制造和工作原理等, 这些都需应用水静力学原理。

液体处于静止状态时, 在液体内部不呈现粘滞性作用, 因而本章所讨论的力学规律, 对理想液体和实际液体都是适用的。

§ 2-1 静水压强及其特性

处于静止状态的液体里不存在切力, 也不会产生拉力, 只有法向的压力。作用在单位面积上的压力定义为平均静水压强。如图 2-1 所示, 设在静止液体内部, 任取一截面 S , 若作用在 A 点周围 ω 面积上总的静水压力为 P (常被叫做静水总压力) 其单位为牛顿(N), 则 $\frac{P}{\omega}$ 叫做面积 ω 上的平均静水压强。当 ω 无限缩小而趋近于面积上的 A 点时, 则 $\frac{P}{\omega}$ 的极限叫做作用于某一点(如 A 点)的静水压强, 以 p 表示, 即

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{P}{\omega} \quad (2-1)$$

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)。

静水压强有两个重要特性:

(1) 静水压强的方向垂直并指向作用面。这是很容易证明的。见图 2-1, 若设想静水总压力 P 不垂直于作用面 ω , 则可将 P 分解为沿 ω 法线方向和切线方向两个分力。然而, 在绪论一章中已经说到, 液体处于静止状态时不可能存在切力, 否则液体必将发生相对

运动, 而不能保持静止状态。所以 P 的作用线必然与 ω 的法线 n 重合, 即 P 垂直于作用面。又由于液体几乎不可能抵抗拉力, 故 P 的方向是与作用面 ω 的内法线相同的。这也就是说静水压强 p 的方向必垂直并指向作用面。

(2) 液体内部任意一点静水压强的大小, 与方位无关。这一重要特性可以简单地从力的平衡

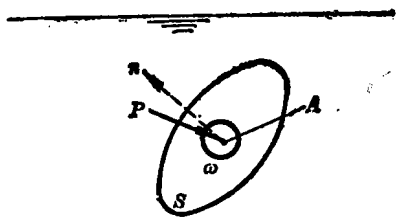


图 2-1

原理来证明。

从静止液体中取出一个无限小五面体 $OABECD$ ，如图 2-2 所示。五面体各边的长度为 dx 、 dy 、 dz 和 dn 。并设作用在面积 $ABCD$ 、 $OECD$ 和 $OABE$ 上的平均静水压强相应地以 p_n 、 p_x 和 p_z 表

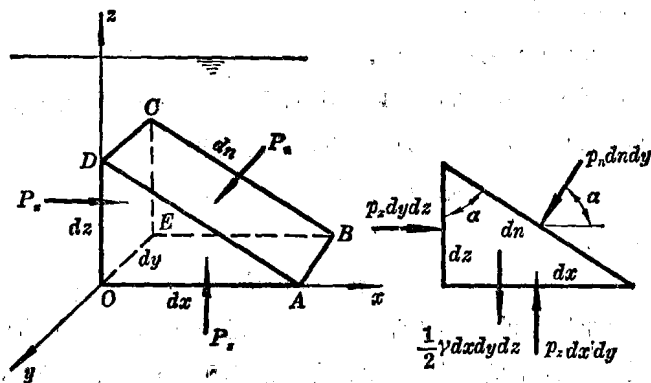


图 2-2

示。由第一特性可知，作用于五面体各面上的平均静水压强，都垂直并指向相应的作用面。因五面体处于静止状态，则根据平衡条件， x 方向的各作用力之和应等于零。即

$$p_n dn dy \cos \alpha - p_x dy dz = 0$$

由于 $dn \cos \alpha = dz$ ，于是

$$p_n = p_x \quad (2-2)$$

同理，由 z 方向可以得出

$$p_z dx dy - p_n dn dy \sin \alpha - \frac{1}{2} \gamma dx dy dz = 0$$

上式中第三项为三阶微量，与前两项比较可略而不计， $dn \sin \alpha = dx$ ，从而可得

$$p_n = p_z \quad (2-3)$$

由式(2-2)和(2-3)得出：

$$p_x = p_z = p_n$$

若将五面体转 90° 后，也可证得 $p_y = p_n$ 。这就说明：液体内某一点的静水压强，各个方向都相等。但要注意，不同点的静水压强，彼此的大小一般不相等。由于我们在水力学中将液体视作连续介质，静水压强将是空间坐标的单值函数，即

$$p = f(x, y, z) \quad (2-4)$$

§ 2-2 重力作用下的液体平衡

在生产实践中，常见的处于静止状态的液体，大多只受重力这一种质量力的作用。下面就来研究这一特殊情况下的液体平衡问题。

一、水静力学的基本方程

在静止液体中取一点 M (图 2-3)，距液面的深度为 h ，以 M 为中心取一微小底面积 $d\omega$ 则形

成高为 h 的无限小圆柱体。若 M 点及 $d\omega$ 面积上的静水压强均为 p ，顶面的液体表面压强为 p_0 ，现取无限小圆柱体为隔离体，分析作用在圆柱体上的力，计有：

1. 作用于顶部的表面总压力 $P_0 = p_0 d\omega$;
2. 作用于底面的总压力 $P = p d\omega$;
3. 圆柱体自重 $G = \gamma h d\omega$ (γ 为液体重率)
4. 作用在圆柱体周围水平方向的压力，大小相等，方向对称，互相抵消。

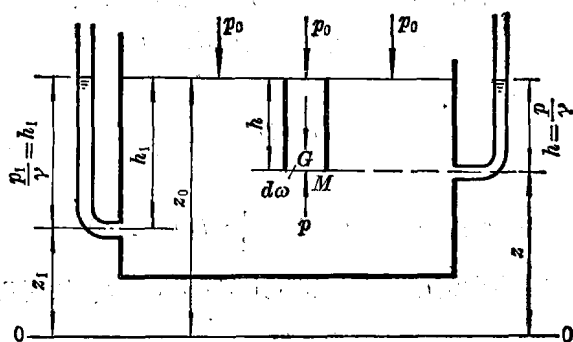
写沿柱体轴线方向(即垂直方向)的力的平衡方程，可得

$$p_0 d\omega + \gamma h d\omega - p d\omega = 0$$

化简后得

$$p = p_0 + \gamma h \quad (2-5)$$

公式(2-5)就是重力作用下的水静力学基本方程。公式说明：在重力作用下的静止液体中，任一点的静水压强 p 是由液面上的压强 p_0 和该点在液面下的深度 h 与液体重率 γ 的乘积两部分组成。如果液面上的压强 p_0 不变，则任一点的静水压强只随深度 h 而变，即该点在液面下越深，压强越大。



水平基准面

图 2-3

水静力学的基本方程还可表达为另一种形式。如图 2-3，取任意水平面 0-0 为基准面，则可知 M 点位于水平基准面以上的高度为 z ，液体自由面(液体与气体的接触面)位于基准面以上的高度为 z_0 ，且 $z_0 - z = h$ ，代入式(2-5)得

$$p = p_0 + \gamma(z_0 - z)$$

上式两端除以 γ ，并移项，得

$$z + \frac{p}{\gamma} = z_0 + \frac{p_0}{\gamma} \quad (2-6)$$

对于重力作用下的静止液体来说，自由面为一水平面，其面上各点 z_0 都相等，而 p_0 为自由液面上的平均压强，故 $z_0 + \frac{p_0}{\gamma}$ 是常数。因此上式可写为

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (2-7)$$

推导公式(2-5)或(2-6)时, M 点是任意选定的。假如在静止液体中任选两点, 相对于同一基准面 $O-O$, 必有

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = C$$

式(2-6)或(2-7)就是水静力学基本方程的另一种表达形式。

二、等压面

静止液体中静水压强相等的各点所形成的面, 叫做等压面。

由式(2-5)可知, 位于水面下同一深度($h = \text{常数}$)的各点静水压强都相等。因此, 在重力作用下的静止液体中, 任一水平面必是等压面。若分析式(2-6), 由 $z = \text{常数}$ 也可得出同样的结论。例如, 静止液体的自由面是水平面, 该面上各点的压强均为大气压强, 所以大气与液体的分界面是等压面; 又如, 两种液体贮于同一容器, 重液体在下, 轻液体在上, 交界面一定是水平面, 所以也是等压面。

在应用水静力学基本方程(2-5)或(2-7)求一点的静水压强时, 掌握和运用等压面这个概念来分析问题, 可使许多复杂的计算变得简单。

要着重指出: 公式(2-5)、(2-7)和等压面的概念, 只对互相连通的同一种液体才可应用。对中间被气体或另一种液体隔断的不相连通的液体就不能应用。图 2-4 中, 1-2、4-5-6 面是等压面, 都在相连通的同种液体上。2-3 虽在同一水平面 z_1 上, 但不是等压面, 因为点 2 处的液体是油, 点 3 处却是水。

例题 2-1 已知水库水面的大气压 $p_a = 98000 \text{ N/m}^2$, 试求水库水深为 10 m 和 15 m 处的静水压强为多少?

解 应用公式(2-5)计算, $p_0 = p_a$

(1) 水深 $h_1 = 10 \text{ m}$ 处的静水压强

$$p_1 = p_a + \gamma h_1 = 98000 + 9800 \times 10 = 196 \text{ kN/m}^2$$

(2) 水深 $h_2 = 15 \text{ m}$ 处的静水压强

$$p_2 = p_a + \gamma h_2 = 98000 + 9800 \times 15 = 245 \text{ kN/m}^2$$

例题 2-2 有一压力供水管道为测出管道 A 点的压强, 在该处安装一多管水银测压计(如图 2-5)。已知测压计显示的各液面和 A 点的标尺读数为: $V_1 = 1.8 \text{ m}$; $V_2 = 0.7 \text{ m}$; $V_3 = 2.0 \text{ m}$; $V_4 = 0.9 \text{ m}$; $V_5 = 1.5 \text{ m}$, 试求点 A 的压强是多少?

解 由水静力学基本方程(2-5)得

$$p_6 = p_A + \gamma (V_5 - V_4)$$

或

$$p_A = p_6 - \gamma (V_5 - V_4)$$

p_6 可通过等压面求出它与其它已知数据的关系。

由前述可知, 互相连通的同一种液体的水平面是等压面, 则图中 6-5、4-3、2-1 面都是等压面。由此得

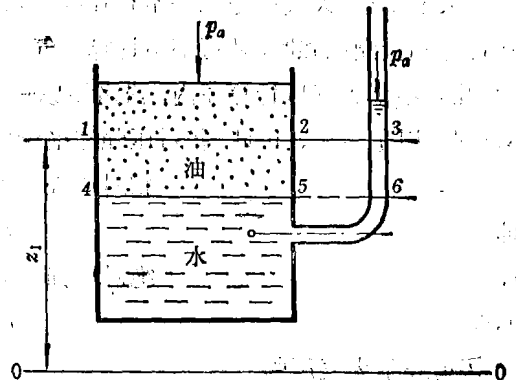


图 2-4

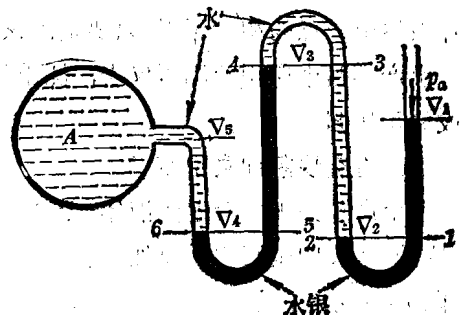


图 2-5