

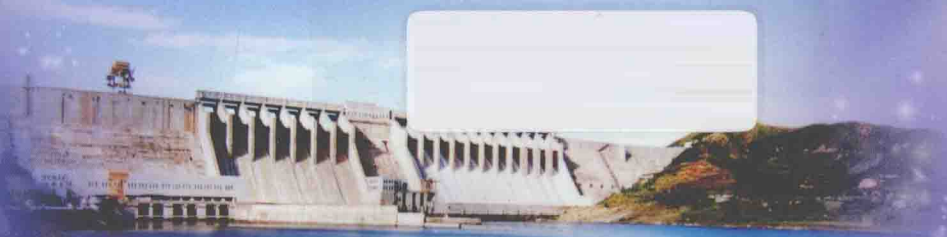
水利部示范性高等职业院校建设规划教材

中央财政支持专业特色教材

水力分析 与计算

主编 张伟丽

主审 李建华



黄河水利出版社

水利部示范性高等职业院校建设规划教材
中央财政支持专业特色教材

水力分析与计算

主 编 张伟丽
副主编 薛元奇
主 审 李建华

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书是水利部示范性高等职业院校建设规划教材、中央财政支持专业——水利水电建筑工程专业建设与课程改革教材,按照教育部颁布的水力分析与计算课程标准,结合山西省水利工程建设实践编写完成的。全书共分6个项目,包括静水压力计算,水流运动的基本原理,水工有压管道水力分析计算,明渠水流分析计算,闸、堰泄流能力分析计算,泄水建筑物下游消能水力分析计算,并附有例题、工程案例、技能训练题、常用图表等。

本书可作为高等职业技术学院水利水电建筑工程、水利工程、水利工程管理、水利工程监理等专业的通用教材,也可作为从事水利工程规划设计、建设与管理一线技术人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水力分析与计算/张伟丽主编. —郑州:黄河水利出版社,
2014.3

水利部示范性高等职业院校建设规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0730 - 0

I. ①水… II. ①张… III. ①水力计算 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TV131.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 042515 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13.25

字数:310千字

印数:1—1 500

版次:2014年3月第1版

印次:2014年3月第1次印刷

定价:30.00元



前言

本书是根据《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)、《教育部关于推进高等职业教育改革创新引领职业教育科学发展的若干意见》(教职成[2011]12号)等文件精神,根据水利部示范性高等职业院校建设计划水利水电建筑工程重点建设专业及专业群人才培养方案要求,在全国水利水电高职教研会指导下,用中央财政安排的“支持高等职业学校专业建设”项目经费组织编写的教材。

本套教材以学生能力培养为主线,以工作任务为载体,融“教、学、练、做”为一体,适合开展项目化教学,体现实用性、实践性和创新性的特色,是一套紧密联系生产实际的高职高专教育精品规划教材。

本书旨在探索“任务驱动、项目导向”等有利于增强学生实践能力的教学方法,实现课程内容与职业标准对接。本书在编写中力求概念清晰、深入浅出、联系实际、理论内容以够用为度,在传统理论基础上编入了新规范、新技术。

本书特色如下:

(1)以项目为导向。打破传统教材体系,依据工程实际中各种水工建筑物水力学问题的解决过程,将本书分为6个项目,教学目标明确。

(2)结合山西省具体案例,加入了U形渠道断面设计方法;对山西省具体的工程案例如溢流坝、泄洪闸、溢洪道进行水力分析与计算。

(3)考虑到计算机在水力计算中的广泛应用,本书在部分章节增加了Excel表格计算方法和案例。

(4)对水利工程中新出现的迷宫堰及常见的侧堰、人字闸等进行介绍,拓展学生知识面。

本书由山西水利职业技术学院承担编写工作,编写人员及编写分工如下:张伟丽编写绪论、项目1、项目4,郭志萍编写项目2,薛元奇编写项目3、项目5、项目6。本书由张伟丽担任主编并负责全书统稿;由薛元奇担任副主编;由山西省汾河水库管理局教授级高级工程师李建华担任主审。

本书的编写得到了山西省水利水电科学研究院张云岗、侯佩瑾、卢绮玲教授级高级工程师,杨凌职业技术学院张春娟副教授,山西省运城市水利工程设计院王为民高级工程师,山西省运城市水利工程建设局李建强高级工程师的大力支持,在此一并表示感谢!

因编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2013年12月



目 录

前 言	
绪 论	(1)
小 结	(5)
技能训练题	(6)
项目 1 静水压力计算	(7)
任务 1 静水压强及其特性	(7)
任务 2 静水压强的基本规律	(8)
任务 3 静水压强的表示方法及量测	(11)
任务 4 作用于平面壁上的静水总压力	(15)
任务 5 作用在曲面壁上的静水总压力	(20)
小 结	(23)
技能训练题	(24)
项目 2 水流运动的基本原理	(29)
任务 1 水流运动的基本概念	(29)
任务 2 恒定总流的连续性方程	(34)
任务 3 恒定总流的能量方程	(36)
任务 4 恒定总流的动量方程	(47)
任务 5 水头损失的类型及其与阻力的关系	(51)
小 结	(68)
技能训练题	(69)
项目 3 水工有压管道水力分析计算	(73)
任务 1 有压管道水力分析	(73)
任务 2 虹吸管及倒虹吸水力计算	(83)
任务 3 水泵装置水力计算	(88)
任务 4 简单给水管路及树状管网水力分析与计算	(90)
小 结	(94)
技能训练题	(95)
项目 4 明渠水流分析计算	(98)
任务 1 概 述	(98)
任务 2 明渠均匀流	(101)
任务 3 河渠水面曲线分析计算	(116)
任务 4 水跌和水跃	(121)
任务 5 棱柱体渠道非均匀渐变流水面曲线分析与计算	(125)



任务6 渐变流水面曲线的计算与绘制	(132)
小 结	(136)
技能训练题	(138)
项目5 闸、堰泄流能力分析计算	(141)
任务1 堰流及闸孔出流基本概念	(141)
任务2 堰的过流能力计算	(143)
任务3 闸孔出流的水力计算	(159)
小 结	(172)
技能训练题	(178)
项目6 泄水建筑物下游消能水力分析计算	(181)
任务1 建筑物下游消能水力分析	(181)
任务2 底流消能水力计算	(182)
任务3 挑流消能水力计算	(194)
小 结	(198)
技能训练题	(199)
附录I 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图	(200)
附录II 梯形和矩形断面明渠底宽求解图	(201)
附录III 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图	(202)
附录IV 建筑物下游河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图	(203)
附 表 希腊字母读音表	(204)
参考文献	(205)



绪 论

1 水力分析与计算及其在水利工程中的应用

1.1 水力分析与计算

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,在与水害做斗争的同时,还兴修了许多巨大的灌溉、航运工程。人类在与水做斗争、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,加上现代科学与试验技术的发展,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,这门学科就是水力分析与计算。

1.2 工程中的水力计算问题

水力分析与计算在水利、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分析与计算问题。例如在河道上修建水利枢纽工程,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分析与计算问题,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、其对工程的影响及如何改善,为合理布置建筑物、确保建筑物正常运行提供依据。

以上这些问题,彼此不是孤立的,也不是水力分析与计算的全部问题。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他一些水力分析与计算问题。

为了解决上述问题,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与计算的问题。由于水流运动的复杂性,目前尚有不少水力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。

2 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,与液体外部的作用条件有关,更主要的是取决于液体本身的内在性质。

2.1 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。但水力分析与计算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、均质和各向同性的连续介质。以水为代表的一般液体,都具有这些基本特性。

2.2 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。下面研究影响液体运动的几个主要物理力学性质。

2.2.1 惯性

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必须施加力,该力的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

$$F = -ma$$

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 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

$$\rho = \frac{m}{V}$$

在国际单位制中,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)。在一个标准大气压(1 atm)下温度为 4℃ 时,水的密度为 1 000 kg/m³。液体的密度随温度和压强有所变化,但这种变化很小,所以水力分析与计算中一



般把水的密度视为常数。

2.2.2 万有引力特性

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

$$G = mg$$

式中 g ——重力加速度,一般采用 9.80 m/s^2 。

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 γ 。对某一重量为 G 、体积为 V 的均质液体,其容重为

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

将 $G = mg$ 代入可得

$$\gamma = \rho g$$

容重的单位为牛顿/米³(N/m³)。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,在一个标准大气压和温度为 4℃ 下为

$$\gamma = \rho g = 1\,000 \times 9.8 = 9\,800 (\text{N/m}^3) = 9.8 \text{ kN/m}^3$$

【例 0-1】 求在一个大气压下,4℃ 时,1 L 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 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$,于是可得 1 L 水的重量为

$$G = \gamma V = 9.8 \times 0.001 = 0.009\,8 (\text{kN}) = 9.8 \text{ N}$$

水的密度为 $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$,于是可得 1 L 水的质量为

$$m = \rho V = 1\,000 \times 0.001 = 1 (\text{kg})$$

2.2.3 黏滞性

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黏滞性,此内摩擦力称为黏滞力。黏滞性是液体固有的物理属性。

如图 0-1 所示,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(黏滞)作用影响第三层的流速,以此类推,离开壁面的距离愈大,壁面对流速的影响愈

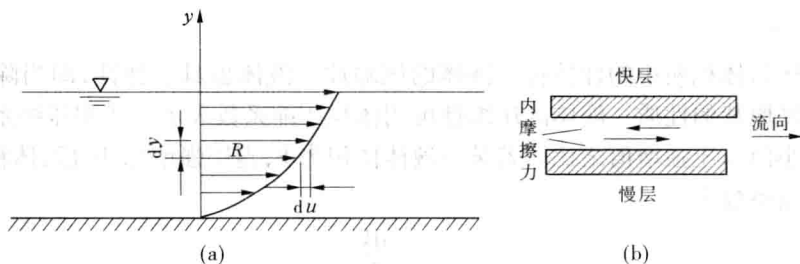


图 0-1

小,于是靠近壁面的流速较小,远离壁面的流速较大。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,就要阻止上面一层。于是在两液层之间产生内摩擦力,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,黏滞性是引起液体能量损失的根源。

液体黏滞性的大小可用动力黏滞系数 μ 或运动黏滞系数 ν 来表示。黏滞系数越大,液体黏滞性就越大。液体的黏滞性与液体的种类和温度有关系,不同温度下水的黏滞系数见表0-1。

表0-1 不同温度条件下水的物理性质(1个标准大气压)

温度 (℃)	容重 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	动力黏滞 系数 μ ($\times 10^{-3}$ Pa·s)	运动黏滞 系数 ν ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	压缩系数 β ($\times 10^{-9}$ 1/Pa)	弹性系数 K ($\times 10^9$ Pa)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495	2.02	0.075 6
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	0.485	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.450	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483	2.07	0.058 9

2.2.4 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 ,当压强增加 dp 后,体积缩小 dV ,则其体积压缩系数为

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp}$$

式中,负号是由于压强增大时,体积要缩小。

液体体积压缩系数的倒数就是体积弹性系数 K :

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

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 $1/20\,000$,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,当水电站出现事故,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。

2.2.5 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。

实际液体的物理性质是很复杂的,如果把所有的物理力学性质都考虑进去,来分析研究水流运动将是十分困难的。为了简化问题、便于理论分析,在研究液体运动时常常引入“理想液体”的概念。所谓理想液体,就是忽略了液体的黏滞性、压缩性和表面张力特性的液体,它和实际液体的主要区别在于考不考虑黏滞性。研究中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黏滞性的,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黏滞性作用不大的实际液体流动的情况。

小 结

一、水力学定义

水力学主要研究液体处于静止状态下的力学规律和液体机械运动规律及其在实际工程中的应用。

二、液体的主要物理力学性质

液体惯性:由液体质量或单位体积的液体质量来度量。

万有引力:由液体重量或单位体积的液体重量来度量。

均质液体密度、容重、重量的关系为: $\rho = \frac{m}{V}$, $\gamma = \frac{G}{V}$, $\gamma = \rho g$ 。

液体黏滞性:液体在运动状态下,流层间产生内摩擦阻力,阻碍相对运动的特性。液体黏滞性的大小用动力黏滞系数或运动黏滞系数来表示,黏滞系数随温度升高而减小。



液体压缩性: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。在一般情况下,水的体积压缩量不大,可不考虑。

表面张力特性:液体自由表面由于水分子及空气分子间的引力不平衡,使自由表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,在一般的水力学问题中,都可以忽略表面张力的影响。

三、连续介质与理想液体假定

在水力学中,液体的基本特性是易于流动、不易压缩、均质和各向同性的连续介质。以水为代表的一般液体,都具有这些基本特性。

理想液体,就是忽略了液体的黏滞性、压缩性和表面张力特性的液体,它和实际液体的主要区别在于考不考虑黏滞性。

技能训练题

- (1) 什么是理想液体?
- (2) 水流能量损失的根源是什么?
- (3) 体积为 1.5 m^3 的水,其重量和质量分别是多少?

项目1 静水压力计算

案例一 山西省运城市白沙河水库,引水涵洞的闸门为平板闸门,门高 $h=3.5\text{ m}$,门宽 $b=2.0\text{ m}$,闸门自重 $G=3\,920\text{ N}$,闸门与门槽之间滑动摩擦系数 $f=0.4$,确定闸门提升力 T 。

案例二 白沙河水库溢洪道进口设有弧形工作闸门。已知闸门宽度 $b=8\text{ m}$,弧形门半径 $R=6\text{ m}$,圆心与水平面齐平,中心角为 45° 。求作用在闸门上的静水总压力。

任务1 静水压强及其特性

1 静水压强

在实际工程和生活中,液体有两种状态:一是液体相对于地球处于静止状态,称绝对静止状态,如水库、蓄水池中的水;二是液体相对于地球有运动,但液体之间、液体与边壁之间没有相对运动,称相对静止状态,如匀速直线行驶的水车中的水。

水力学中把静止液体产生的压力称为静水压力,用大写字母 P 表示。如图 1-1 所示的平板闸门上任取一点 M ,围绕 M 取一微小面积 ΔA ,作用于该面积上的静水压力为 ΔP ,当 ΔA 趋近于零时,则平均压强 $\Delta P/\Delta A$ 的极限称为 M 点的静水压强,用小写字母 p 表示,即

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

水力学中的压强如果无特殊说明,一般指点压强。

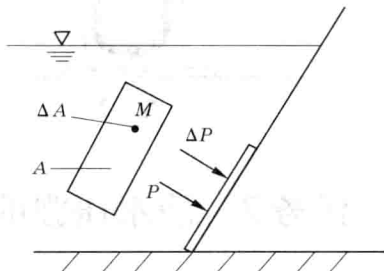


图 1-1

2 静水压强的特性

首先观察一个试验。

如图 1-2 所示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。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接到测压管 A 端,B 端仍与大气相通,这时管中液面仍在同一水平面上。

试验开始,用手指压橡皮膜,则 A 端液面降至 C 点,B 端液面升至 D 点。若手指加大压力,两端液面差也加大;手指放开,液面又恢复到同一水平面上。

若把橡皮膜放入水中,同样可看到 A 端液面降低,B 端液面升高。入水越深,液面差 h 越大,与加大手指压力时的现象相似。试验说明,静水中存在压强,而且静水压强随水

深的增加而增大。

当扎有橡皮薄膜的小圆盒在水中的中心位置不变,使橡皮薄膜向上、向下、向旁侧转动,测压计两端的液面都是不变的。

上述试验表明: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于作用面,则水体将受到剪切力作用而产生流动。因此,静止液体内部不存在剪切力。同时,静止液体也不可能承受拉力作用,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,这两个特性是很重要的。例如,在图 1-3 所示的边壁转折处 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,但静水压强的大小是相同的。

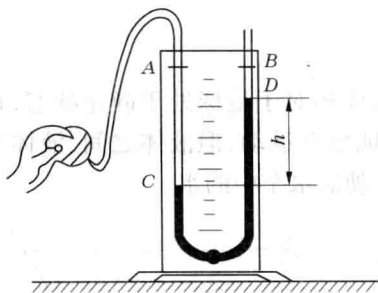


图 1-2

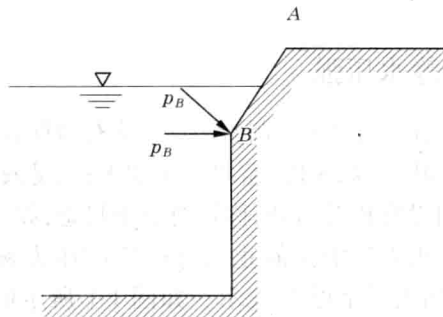


图 1-3

任务 2 静水压强的基本规律

1 静水压强基本方程

从前面的试验可知,静水压强是随水深增加的,但它是按什么规律变化的呢? 图 1-4 为仅在重力作用下处于静止状态的水体。水表面受到压强 p_0 的作用, p_0 称为表面压强。现研究位于水面下铅垂线上任意两点 1、2 的压强 p_1 和 p_2 间的关系。以 1、2 点为圆心,分别取微小水平面积 ΔA , 取以 ΔA 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:

(1) 小水柱的自重(重力) $G = \gamma \Delta h \Delta A$, 方向垂直向下。

(2) 由于 ΔA 很小,可认为该面积上各点的压强相等,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

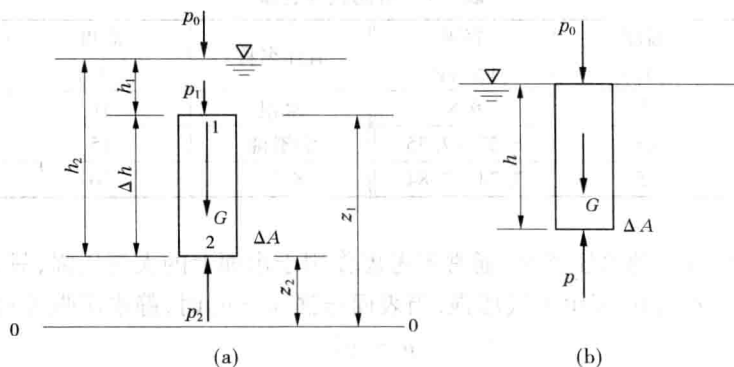


图 1-4

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。铅垂方向的静力平衡方程为

$$p_2 \Delta A - p_1 \Delta A - \gamma \Delta h \Delta A = 0$$

方程两边同时除以 ΔA 并整理得

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

p_2 是下面一点的压强, p_1 是上面一点的压强, 上式可写作

$$p_{\text{下}} = p_{\text{上}} + \gamma \Delta h \quad (1-3)$$

若将 1 点(即上点)取在水面上, 则 $h_1 = 0$ 、 $h_2 = \Delta h = h$ 、 $p_1 = p_0$ 、 $p_2 = p$, 上式写成

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-4)$$

式(1-4)是常见的静水压强基本方程。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。

由式(1-4)可知, 在静止液体中若表面压强 p_0 由某种方式使之增大, 则此压强可大小不变地被传递到液体中的各个地方, 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。

上述静水压强方程式中, 任意点的位置是从水面往下算的, 用水深表示。若取公共水平面 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 , 则可把式(1-2)变换为另外一种形式, 从图 1-4 可得 $\Delta h = z_1 - z_2$, 代入式(1-2)可得

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

即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (1-5)$$

式(1-5)是静水压强基本方程的另一种表达形式。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(1-5)还表明, 在均质、连通的液体中, 水平面必然是等压面, 这就是通常所说的连通器原理。

静水压强基本规律同样也适用于其他液体, 区别只在于容重 γ 的不同。几种常见液体和空气的容重见表 1-1。

表 1-1 常见流体容重

流体名称	温度 (℃)	容重 (kN/m ³)	流体名称	温度 (℃)	容重 (kN/m ³)
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,只计算超过大气压的压强数值。若用 p_a 表示大气压强,当表面压强 $p_0 = p_a$ 时,静水压强可写为

$$p = \gamma h \quad (1-6)$$

【例 1-1】 分别计算水库中水深为 5 m、10 m 处的静水压强。

解:水库表面压强为大气压,水的容重 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$

水深 5 m 处的静水压强 $p = \gamma h = 9.8 \times 5 = 49 (\text{kPa})$

水深 10 m 处的静水压强 $p = \gamma h = 9.8 \times 10 = 98 (\text{kPa})$

【例 1-2】 分别求出水和汞两种液体中深度 1 m 处的静水压强。已知液面压强为大气压,水银容重 $\gamma = 133.3 \text{ kN/m}^3$ 。

解:水中深度 1 m 处的静水压强 $p = \gamma h = 9.8 \times 1 = 9.8 (\text{kPa})$

水银中深度 1 m 处的静水压强 $p = \gamma h = 133.3 \times 1 = 133.3 (\text{kPa})$

2 静水压强基本方程的意义

2.1 几何意义

如图 1-5 所示容器中,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。测压管液面压强为大气压,根据连通器原理,则:

$$p_1 = \gamma h_1 \quad p_2 = \gamma h_2$$

因此

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} \quad h_2 = \frac{p_2}{\gamma}$$

显然,在均质连通的容器内, γ 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 $h = p/\gamma$ 为压强水头或测压管高度。这说明液体容重为定值时,一定的液柱高 h 就相当于确定的静水压强值。

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。因此,式(1-5)表明处于静止状态的水中,各点的测压管水头为一常数,即各点的位置高度和压强水头之和为一常数:

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (1-7)$$

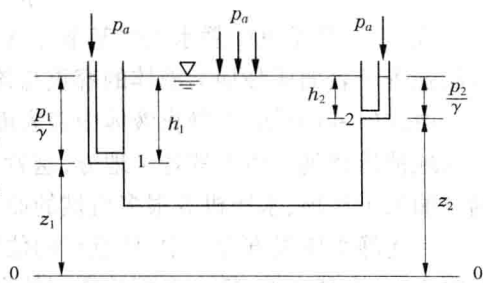


图 1-5



常数 C 的大小随基准面的位置而变,基准面一定,常数 C 也就定下来了。

连接各点测压管中水面的线称为测压管水头线。因此,静水压强基本方程从几何上表明:静止状态的水中,测压管水头线必为水平线。

2.2 物理意义

由物理学可知: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 1-5 的点 1 处设置测压管,则测压管水面上升 $h_1 = \frac{p_1}{\gamma}$,这表明水面上升是压力做功的结果。使位置势能增加的那部分势能

即为压力势能(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 所具有的全部势能应为位置势能与压力势能两项之和,即

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

单位重量水体所具有的势能称单位势能,以 $E_{\text{势}} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$,则由式(1-7)得

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

所以,静水压强基本方程从能量观点表明:仅受重力且处于静止状态的水中,任意点对同一基准面的单位势能为一常数。

任务3 静水压强的表示方法及量测

1 静水压强单位

水利工程实践中,静水压强有三种单位,即应力单位、大气压和液柱高度。

1.1 以应力单位表示

压强用单位面积上的力来表示,即用应力单位来表示,这是压强的基本表示方法。单位为 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$ 或 $\text{kPa}(\text{kN}/\text{m}^2)$ 。

1.2 以大气压表示

地球表面产生的压强称为大气压强。物理学中规定以海平面的平均大气压 760 mm 高的水银柱的压强为一标准大气压(代号 atm),其数值为

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 101.3 \text{ kPa}$$

工程中为计算简单起见,规定

$$1 \text{ 工程大气压} = 1.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 98 \text{ kPa}$$

1.3 以液柱高度表示

由于一般液体的容重可以看作常量,液柱高 $\frac{p}{\gamma}$ 的数值就反映压强的大小。这种用液