



全国水利行业“十三五”规划教材(职业技术教育)
(“互联网+”创新型教材)
中国水利教育协会策划组织

水力分析与计算

主编 邢菊香

主审 宋春发



黄河水利出版社

全国水利行业“十三五”规划教材(职业技术教育)
 (“互联网+”创新型教材)
 中国水利教育协会策划组织

水力分析与计算

主 编 邢菊香
副主编 薛元琦 赵秀凤 郑慧玲
 斯庆高娃 汪小妹
主 审 宋春发

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书是全国水利行业“十三五”规划教材,是根据中国水利教育协会职业技术教育分会高等职业教育教学研究会制定的水力分析与计算课程标准编写完成的。全书共分11个项目,内容包括:水力分析与计算基础、水工建筑物壁面静水荷载分析与计算、恒定管流水力分析与计算、明渠恒定均匀流水力分析与计算、明渠恒定非均匀流水力分析与计算、孔口与管嘴出流水力分析与计算、堰流水力分析与计算、闸孔出流水力分析与计算、泄水建筑物下游消能水力分析与计算、渗流水力分析与计算、高速水流基础,每个项目附带任务。

本书可作为高职高专水利水电建筑工程专业教材,也可供水利类相关专业教学使用及相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力分析与计算/邢菊香主编. —郑州:黄河水利出版社,2018.7

全国水利行业“十三五”规划教材. 职业技术教育
ISBN 978 - 7 - 5509 - 2008 - 8

I. ①水… II. ①邢… 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(2018)第054680号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwlp@163.com
田丽萍 66025553 912810592@qq.com

出版社:黄河水利出版社 网址:www.yrep.com

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:hhslebs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:16.5

字数:380千字

印数:1—3 100

版次:2018年7月第1版

印次:2018年7月第1次印刷

定价:45.00元

(版权所有 盗版、抄袭必究 举报电话:0371-66025553)



前言

本书是贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010~2020年)》、《国务院关于加强发展现代职业教育的决定》(国发〔2014〕19号)、《现代职业教育体系建设规划(2014~2020年)》和《水利部 教育部关于进一步推进水利职业教育改革发展的意见》(水人事〔2013〕121号)等文件精神,依据中国水利教育协会水教协〔2016〕16号文《关于公布全国水利行业“十三五”规划教材名单的通知》,在中国水利教育协会精心组织和指导下,由中国水利教育协会职业技术教育分会组织编写的全国水利行业“十三五”规划教材。教材以学生能力培养为主线,适当增加了二维码链接,具有鲜明的时代特点,体现了实用性、实践性、创新性的特色,是一套水利高职教育精品规划教材。

本书的所有项目都设有“学习目标”和“技能目标”,目的是让学生在学习一个项目之前清楚学习内容和学会的技能是什么;用二维码的形式介绍一位水利专家,让学生知道水利行业前景广阔,可以尽情施展自己的才能。每个项目的任务除思考题和计算题外,还配有二维码的自测题,以增加学生的学习兴趣。

本书采用我国《水利技术标准汇编》和《室外给水设计规范》(GB 50013—2006)中推荐的计算方法,使学生能及时掌握最合适的水力计算方法,能直接参与水利工程的水力计算。

考虑到各学院的专业及课程教学的学时差异,本书的项目较多,各学院可根据自己的实际选择讲授的项目。

本书编写人员及编写分工如下:内蒙古机电职业技术学院邢菊香编写导论、项目9,内蒙古机电职业技术学院魏学敏编写项目1,内蒙古机电职业技术学院斯庆高娃编写项目2、项目3,山西水利职业技术学院薛元琦编写项目4、项目5,河南水利与环境职业学院赵秀凤编写项目6~项目8,内蒙古机电职业技术学院郑慧玲编写项目10,湖北水利水电职业技术学院汪小妹编写项目11。本书由邢菊香担任主编,并负责全书统稿,由薛元琦、赵秀凤、郑慧玲、斯庆高娃、汪小妹担任副主编,由安徽水利水电职业技术学院宋春发担任主审。

本书在编写过程中,得到了各院校的专家、教授以及黄河水利出版社的支持、帮助,同时参考了不少相关资料、著作、教材,对提供帮助的同仁及资料、著作、教材的作者,在此一并致以诚挚的谢意!

虽然我们在编写本书时力求做到尽善尽美,但由于时间和水平有限,书中的不足之处在所难免,欢迎广大读者提出宝贵的意见和建议,以便今后更好地改进和提高。

编者
2018年3月



目 录

前 言	
导 论	(1)
导论任务	(7)
项目 1 水力分析与计算基础	(8)
任务 1.1 静水力学分析	(8)
任务 1.2 水流运动分类	(13)
任务 1.3 恒定流连续性分析与计算	(18)
任务 1.4 恒定流能量守恒及转换分析	(20)
任务 1.5 恒定流动量守恒及转换分析	(28)
任务 1.6 水头损失及水流运动的两种型态	(33)
项目任务	(44)
项目 2 水工建筑物壁面静水荷载分析与计算	(46)
任务 2.1 作用于平面壁上的静水总压力分析与计算	(46)
任务 2.2 作用于曲面壁上的静水总压力分析与计算	(53)
项目任务	(57)
项目 3 恒定管流水力分析与计算	(61)
任务 3.1 有压管道的类型	(61)
任务 3.2 简单有压管道水力分析与计算	(62)
任务 3.3 虹吸管及水泵水力分析与计算	(73)
任务 3.4 倒虹吸管水力分析与计算	(78)
任务 3.5 有压隧洞水力分析与计算	(84)
项目任务	(92)
项目 4 明渠恒定均匀流水力分析与计算	(97)
任务 4.1 明渠水流分析	(97)
任务 4.2 明渠均匀流的水力计算	(102)
任务 4.3 明渠水力计算其他问题	(110)
任务 4.4 渡槽水力分析与计算	(115)
项目任务	(118)
项目 5 明渠恒定非均匀流水力分析与计算	(120)
任务 5.1 明渠恒定非均匀流的基本概念	(120)
任务 5.2 水跌及水跃的水力分析与计算	(128)
任务 5.3 渠道水面曲线分析与计算	(135)
项目任务	(148)

项目 6 孔口与管嘴出流水力分析与计算	(152)
任务 6.1 孔口与管嘴出流水力现象	(152)
任务 6.2 恒定孔口出流水力计算	(153)
任务 6.3 恒定管嘴出流水力计算	(157)
项目任务	(160)
项目 7 堰流水力分析与计算	(162)
任务 7.1 堰流水力分析	(162)
任务 7.2 薄壁堰流水力分析与计算	(165)
任务 7.3 实用堰流水力分析与计算	(167)
任务 7.4 有坎宽顶堰流水力分析与计算	(175)
任务 7.5 无坎宽顶堰流水力分析与计算	(181)
项目任务	(185)
项目 8 闸孔出流水力分析与计算	(187)
任务 8.1 闸孔出流水力分析	(187)
任务 8.2 闸孔出流水力计算实例	(194)
项目任务	(197)
项目 9 泄水建筑物下游消能水力分析与计算	(199)
任务 9.1 泄水建筑物下游消能基本形式	(199)
任务 9.2 衔接形式水力计算及判断	(202)
任务 9.3 底流式消能水力计算	(207)
任务 9.4 挑流消能水力计算	(220)
项目任务	(227)
项目 10 渗流水力分析与计算	(229)
任务 10.1 渗流水力分析	(229)
任务 10.2 恒定渐变渗流浸润线的分析与计算	(236)
任务 10.3 排水廊道和井的水力计算	(240)
任务 10.4 井群的水力计算	(244)
项目任务	(246)
项目 11 高速水流基础	(248)
任务 11.1 水工建筑物的气蚀现象分析与计算	(248)
任务 11.2 明渠高速掺气水流现象分析与计算	(252)
项目任务	(256)
附录 希腊字母读音表	(257)
参考文献	(258)



导 论

1 水力分析与计算的研究对象

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。随着生产发展的需要,在与水害做斗争的同时,兴修了许多利用水的巨大的灌溉工程和航运工程。人类在与水打交道的过程中,防止水害、兴修水利的理念逐步深入,逐渐认识了水的运动规律,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以水为代表的液体静止和运动的规律,探讨以水为代表的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,这门学科即为水力分析与计算。

2 水力分析与计算的任务及学习目标

自古以来的人类活动,乃至现代化工农业生产的各个部门,无不与水有着密切的联系。因此,水力分析与计算已成为解决与液体运动有关的各种工程技术问题的重要手段之一,并不断丰富和完善。水力分析与计算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、发电的需要,通常要在河道上修闸筑坝形成水库,用来控制与调节水位和水量。水库蓄水形成水库后,便会出现以下需要分析和计算的问题:

(1) 闸坝除挡水外还要控制水流,从水库向下游宣泄洪水、供水和引水发电,需要修建溢洪道、泄洪洞及引水洞等建筑物,泄水建筑物需要多大的孔口尺寸才能满足通过的设计流量。

(2) 闸坝挡水后,会受到巨大的水压力,这个水压力会使闸门、坝体有向下游倾倒或移动的趋势。另外,水压力还是闸门、坝体的重要荷载之一。因此,正确计算水压力是闸坝稳定计算与结构计算的必要条件。

(3) 从泄水建筑物下泄的水流一般为高速水流,流速很大,会冲刷河床和岸坡,危及建筑物的安全,采取怎样的措施改善水流条件,消除多余的动能和预防冲刷,避免对水工建筑物及河道的冲刷等。

(4) 闸坝挡水后,抬高了上游水位,形成水库,为估算淹没和迁移范围,必须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。

(5) 闸坝的基础为岩石或土壤,大多能够透水。闸坝挡水后在上、下游水位差的作用下,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。

归纳起来,在水利水电工程中经常遇到的水力分析与计算主要有六个方面:一是水对水工建筑物的作用力(如闸、坝、挡墙是否会在水压力作用下滑动);二是水工建筑物及河

渠的过流能力及尺寸计算(如渠道、管道的断面形状及尺寸、能过多少水);三是水流机械能的利用和损失(如下泄水流是否会冲刷破坏、水泵能否抽水、虹吸能否发生等);四是河渠水面线计算(确定河渠的清淤及堤防顶高程);五是水流的流态及泄水建筑物下游水流的消能计算(如何防止下泄水流的冲刷破坏);六是建筑物的渗流(如井的设计,大坝、闸的防渗等)。此外,还有一些特殊的计算,如管、渠非恒定流,高速水流中的空蚀、振动、掺气,夹沙水流,破浪运动等。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。

学习水力分析与计算这门课程的目标:一是培养同学们的职业技能,如计算水对建筑物的压力,设计城镇给水排水管网,设计灌溉管、渠,进行泵站、电站的水力计算,进行虹吸管、渡槽、涵洞、消能的水力计算等;二是为专业及后续专业课如水工建筑物、给水排水、水文学、城市水务、水电站、港航、农业排灌等打下基础。同时,水力分析与计算也是专升本、考取研究生的必修课程。

从事水利工程建设,是一项伟大而神圣的职业,若参与建设如图 0-1、图 0-2 所示的水利工程,那是多么自豪。通过学习,读者会理解三峡船舶“爬楼梯”过大坝的原理,也会清楚三峡 77 个孔口泄流量的计算方法,还会明白水利工程中确定移民数量及泄流建筑物下游消能设计等。



图 0-1 长江三峡水利枢纽工程

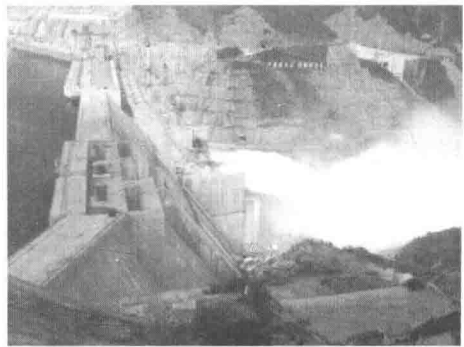


图 0-2 乌江渡水电站

3 液体的基本特性

自然界的物质一般有三种存在形态,即固体、液体和气体。液体的基本特性主要是从力学的角度,研究其与固体、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而抵抗拉伸变形,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,它可以任意扩散而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。

从微观角度看,液体分子之间具有空隙,并且进行着复杂的微观运动,是不连续、不均



匀的。液体和其他物质一样,都是由分子或原子组成的。由于分子或原子间存在间距,产生空隙,致使液体各物理量在时空上产生不连续变化,给分析液体运动带来困难。由于水力分析与计算是为水利工程服务的,是分析计算液体的宏观机械运动,并不关心液体分子的微观运动,所以在水力分析与计算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组成的中间没有空隙存在的连续介质。所谓液体质点,是指由许多分子组成、无微观运动、体积很小可以忽略不计的小水团,它是水力分析与计算的液体的最小单位。另外,在水力分析与计算中,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。这样就可以运用数学中的连续函数来分析水力分析与计算问题。实践证明,这一假定对水力分析与计算的问题有足够的精确性。因此,液体的基本特性可以总结为易流动、不易压缩、均质等向。

4 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,分析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,下面着重讨论与液体运动有关的几种主要物理力学性质。

4.1 惯性

物体所具有的保持原有运动状态的物理性质叫惯性。液体与其他物体一样也具有惯性。惯性用质量度量,质量愈大,惯性愈大。当物体受其他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他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

$$F = -ma$$

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,质量的单位为千克(kg),长度的单位为米(m),时间的单位为秒(s),力的单位为牛(N)或千牛(kN)。

对于均质液体,其质量大小可以用密度来表示,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 的均质液体的密度为

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

在国际单位制中,密度的单位为千克/米³(kg/m³)。

对于均质液体,其质量大小可以用密度来表示,液体的密度与液体的种类有关,同一种液体的密度随压强和温度的变化而变化,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 $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 作为计算值,也就是在水力计算中认为水的密度是一个常量。

4.2 万有引力特性

物体之间具有相互吸引力的性质,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。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 , 水力分析与计算中取 $g = 9.8\text{ m/s}^2$, 则重力为

$$G = mg$$

国际单位制中重力的单位为牛(N)或千牛(kN),质量的单位为kg。

对于均质液体,其重力的大小可以用容重来表示,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

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

将 $G = mg$ 代入上式可得

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \gamma/g$$

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

液体的容重与液体的种类有关,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 $\gamma = 9\,800$ 牛/米³(N/m³)作为计算值,也就是说,在水力计算中认为水的容重是一个常量。几种常见液体的容重值见表0-1,不同温度条件水的容重值见表0-2。

表0-1 几种常见液体的容重 γ 值(一个标准大气压)

液体名称	汽油	纯酒精	蒸馏水	海水	水银
温度(℃)	15	15	4	15	0
容重(kN/m ³)	6.664 ~ 7.350	7.778 3	9.800	9.996 ~ 10.084	133.280

表0-2 不同温度条件下水的物理性质(1个标准大气压)

温度(℃)	密度 ρ (kg/m ³)	容重 γ (kN/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)	体积压缩系数 β ($\times 10^{-9}$ /Pa)	体积弹性系数($\times 10^9$ Pa)	表面张力系数 σ ($\times 10^{-2}$ N/m)	汽化压强(kN/m ²)
0	999.9	9.805	1.781	1.785	0.495	2.02	7.56	0.60
5	1 000.0	9.807	1.518	1.519	0.485	2.06	7.49	0.87
10	999.7	9.804	1.306	1.306	0.476	2.10	7.42	1.18
15	999.1	9.798	1.139	1.139	0.465	2.15	7.35	1.70
20	998.2	9.789	1.002	1.003	0.459	2.18	7.28	2.34
25	997.0	9.777	0.890	0.893	0.450	2.22	7.20	3.17
30	995.7	9.764	0.798	0.800	0.444	2.25	7.12	4.24
40	992.2	9.730	0.653	0.658	0.439	2.28	6.69	7.38
50	988.0	9.689	0.547	0.553	0.437	2.29	6.79	12.16
60	983.2	9.642	0.466	0.474	0.439	2.28	6.62	19.91
70	977.8	9.589	0.404	0.413	0.444	2.25	6.44	31.16
80	971.8	9.530	0.354	0.364	0.455	2.20	6.26	47.34
90	965.3	9.466	0.315	0.326	0.467	2.14	6.08	70.10
100	958.4	9.399	0.282	0.294	0.483	2.07	5.89	101.33

4.3 黏滞性

摩擦力是自然界中普遍存在的物理现象。两块具有不同运动速度叠放在一起的木



板,在其接触面上存在着阻碍两木板相对运动的摩擦力,同样,具有不同流速的相邻两流层(两层水流),在其接触面上也存在着阻碍两流层做相对运动的摩擦力,液体在静止状态下不能够承受剪切力抵抗剪切变形,但是运动的液体,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,这种特性称为液体的黏滞性。液体间的内摩擦力又称为黏滞力。单位面积上的摩擦阻力称为黏滞切应力或切应力,以 τ 表示。自然界中所有的液体都有不同程度的黏滞性,黏滞性是液体的一种固有物理属性。

如图 0-3(a)所示,液体沿固体表面做平行直线流动,设流动方向为 x ,与流动方向垂直的为 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。因为液体具有黏滞性,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,在两流层之间就会产生一对大小相等、方向相反的内摩擦力。上层流速大的液体对下层流速小的液体的作用力方向与流动方向相同,下层流速小的液体对上层流速大的液体的作用力方向与流动方向相反。于是在两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。

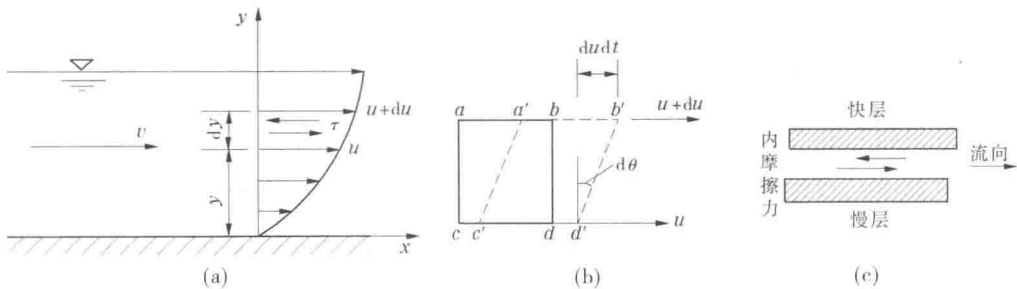


图 0-3

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 $\frac{du}{dy}$ 和流层接触面积 A 成正比,与接触面上的压力无关,其表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

式中 μ ——动力黏滞系数(见表 0-2)。

这一结论得到了后人验证,被称为牛顿内摩擦定律。

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黏滞切应力,以符号 τ 表示。

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

作用在两相邻液层之间的黏滞切应力 τ 数值相等、方向相反。

液体的黏滞性还可以表达为动力黏滞系数 μ (见表 0-2)与液体密度 ρ 的比值,用符号

ν 表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

式中 ν ——运动黏滞系数(见表 0-2),国际单位制中 ν 的单位是米²/秒(m²/s),也可使用 cm²/s。

不同液体的动力黏滞系数 μ 和运动黏滞系数 ν 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,黏滞系数随压强变化很小,一般可以忽略,温度是影响黏滞系数的主要因素。

黏滞性对液体运动有两个重要作用:一是传递运动,保证液体运动空间的连续性;二是消耗能量,液体运动要克服液体质点间的摩擦力做功,其能量来自于运动液体自身的机械能,导致机械能沿流程减少。黏滞性是运动液体能量损失的根源。

4.4 压缩性

物体在外力作用下产生变形、体积缩小的性质,称为压缩性;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。当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。

水的压缩性很小,10℃时,体积模量 $K = 1.96 \times 10^6$ kN/m²,容易推算,每增加 1 个大气压,水的体积相对压缩量约为 1/20 000。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,对于水电站中的高压输水管道,当水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。

4.5 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/米(N/m)。 σ 值随液体的种类和温度而变化,20℃时水和水银的 σ 值分别为 0.072 8 N/m 和 0.514 N/m。

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,在水力试验中,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 0-4 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 ,除与液体的性质有关,还与管径有关。管径愈小,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 10 mm。

上述液体的五种物理力学性质中,惯性、万有引力特性和黏滞性较为重要,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

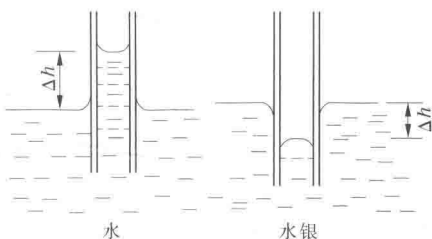


图 0-4

不计。

5 理想液体

实际液体,水利工程中的主要介质就是水,除具有惯性、万有引力等特性外,还存在黏滞性、压缩性、表面张力,这些特性都会对液体运动产生一定的影响,但影响程度有很大差别。例如,压缩性和表面张力只有在一些特殊情况下才产生比较大的影响,一般情况下可以忽略,而黏滞性使水流运动变得十分复杂,给分析计算液体运动带来很大困难。为了简化问题,便于分析计算,便提出分析液体运动的简化模型——“理想液体”。

所谓“理想液体”,就是把液体看作不可压缩和膨胀、没有黏滞性、没有表面张力的连续介质。在水力分析与计算中,常采用通过对“理想液体”进行分析得到一定规律,再考虑实际液体的黏滞性等加以修正的方法。

总之,水力分析与计算的液体主要是水。计算中认为水的密度和容重是常量,它是容易流动、不易压缩、均匀等向的连续介质。

导论任务

一、思考题

1. 水利工程中经常遇到的水力分析与计算问题有哪些?
2. 液体的基本特性是什么?
3. 密度和容重之间有何关系?
4. 水力分析与计算中,水的密度、容重计算值是如何确定的?

二、计算题

1. 体积为 2.5 m^3 , 重量为 17.1 kN 的液体, 其容重、密度各为多少?
2. 一个大气压下, $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 1 L 水的重量和质量各为多少?
3. 水的容重 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$, 动力黏滞系数 $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求其运动黏滞系数 ν 。空气的容重 $\gamma = 11.5 \text{ N/m}^3$, 运动黏滞系数 $\nu = 1.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 求其动力黏滞系数。



自测题

项目 1 水力分析与计算基础

【学习目标】

1. 掌握静水压力及压强的概念及特性；
2. 掌握水流运动的基本要素及恒定水流三大方程的应用；
3. 掌握水头损失的计算；
4. 熟悉压强的单位及表示方法；
5. 熟悉三大方程的应用条件；
6. 了解水流运动的两种型态。



专家介绍

【技能目标】

1. 熟练计算静水对平面壁和曲面壁建筑物的压力；
2. 熟练计算管道及容器内的压强；
3. 能应用恒定流连续方程、能量方程、动量方程进行水力计算；
4. 能正确选择标准和规范中的公式，计算工程中的管流、渠流水头损失。

任务 1.1 静水力学分析

1.1.1 静水压力

各种水利工程建筑物中与水直接接触的部分(如闸门、坝面等)都有水压力的作用,这些接触面称为受压面。就是在水体的内部,一部分水体对相邻部分的水体也有压力的作用,这种压力称为水压力,用 P 表示,其单位为力的单位,一般用牛(N)或千牛(kN)来表示。当水处于静止状态时,水压力就是静水压力。

1.1.2 静水压强

如图 1-1 所示的平板闸门上任取一点 K ,围绕 K 点取一微小面积 ΔA ,作用于该面积上的静水压力为 ΔP ,当 ΔA 趋近于0时,则平均压强 $\Delta P/\Delta A$ 的极限称为 K 点的静水压强,用小写字母 p 表示,即

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

注:水力学中的压强,如果不特别说明,一般指点压强。

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

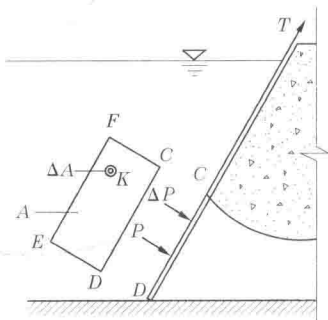


图 1-1



1.1.3 静水压强的特性

静水压强有如下两个基本特性:

第一个特性:静水压强的方向永远垂直并指向受压面。因为静止液体不能承受剪力,否则静止液体就会沿壁面产生分力,液体会朝着分力方向流动,液体也不能承受拉力,否则会发生膨胀运动。这些都与水的静止状态不符合,所以静水压强只能垂直指向受压面。

第二个特性:静止液体中任一点所受各个方向的压强大小相等。

为证明这一特性,在静止液体中取微小四面体 $OABC$,如图 1-2 所示。取四面体的三个边 OA 、 OB 、 OC 相互垂直且分别与 OX 、 OY 、 OZ 轴重合,长度分别为 dx 、 dy 、 dz 。作用于四面体的四个面 OBC 、 OAC 、 OAB 及 ABC 上的平均静水压强分别为 p_x 、 p_y 、 p_z 及 p_n ,四面体所受的质量力仅有重力。以 dA 代表 $\triangle ABC$ 的面积,由于液体处于静止状态,所以四面体在三个坐标方向上所受外力的合力均等于 0,即

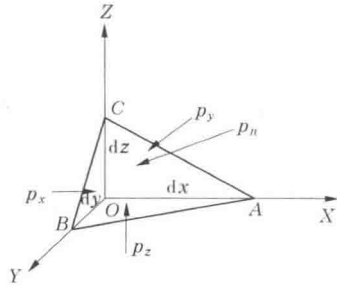


图 1-2

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}p_x dydz - p_n dA \cos(n, x) &= 0 \\ \frac{1}{2}p_y dx dz - p_n dA \cos(n, y) &= 0 \\ \frac{1}{2}p_z dx dy - p_n dA \cos(n, z) - \frac{1}{6}\gamma dx dy dz &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

当 dx 、 dy 、 dz 趋于零时, p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n 即为作用于 O 点而方向不同的静水压强。因 $\frac{1}{6}\gamma dx dy dz$ 属于三阶微量,可以忽略不计,且由于

$$\left. \begin{aligned} dA \cos(n, x) &= \frac{1}{2} dy dz \\ dA \cos(n, y) &= \frac{1}{2} dx dz \\ dA \cos(n, z) &= \frac{1}{2} dy dx \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

则有

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (1-4)$$

由于 p_n 的方向是任意的(四面体的斜面 $\triangle ABC$ 可任意取),所以式(1-4)就说明作用于 O 点各个方向的静水压强的大小均相等。

静水压强的第二特性表明,静止液体中各点压强的大小仅随空间位置的变化而变化,与受压面的方向无关。

1.1.4 静水压强基本方程及意义

1.1.4.1 静水压强基本方程

当水处在静止状态时,作用在水体上的力只有重力。如图 1-3 所示,在静水中任取一点 A ,该点在水面以下的淹没深度为 h (h 也称为淹没水深),压强为 p ,水面压强为 p_0 。围绕点 A 取一微小面积 dA ,以 dA 为底、 h 为高取一铅直液柱为脱离体进行受力分析。

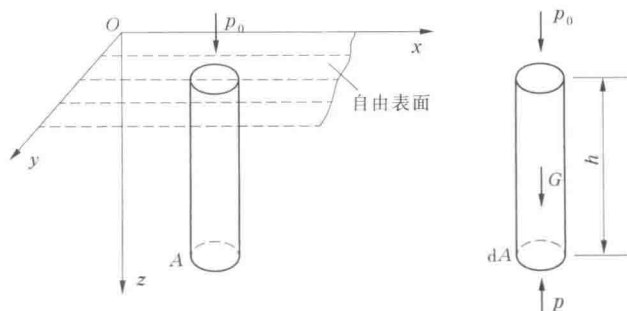


图 1-3

(1) 小水柱的自重(重力)为 G , $G = \gamma h dA$, 方向铅直向下。

(2) 作用于小水柱上表面所受静水总压力为 $p_0 dA$, 方向铅直向下, 作用于小水柱底面上的总压力为 $p dA$, 方向铅直向上。

(3) 作用于小水柱侧面上的水压力, 因其侧面皆为铅直面, 则侧面上所受的水压力皆为水平力, 因小水柱处于平衡状态, 水平方向上的力相互抵消。在铅直方向, 因小水柱处于平衡状态, 作用于小水柱上的所有外力之和等于零, 小水柱沿铅直方向的平衡方程为

$$p dA - p_0 dA - \gamma h dA = 0 \quad (1-5)$$

方程两边同除以 dA 并整理得

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-6)$$

式(1-6)为仅在重力作用下的液体平衡方程式, 也称为静水压强基本方程。它表明仅在重力作用下的静水中任一点静水压强 p 等于水面压强 p_0 和该点在水面以下的深度 h 与水的容重 γ 的乘积之和 (γh 也叫水重压强)。如果把式(1-6)中水的容重换成其他液体, 也有同样的规律。通过式(1-6)可以看出: 液体表面压强可以大小不变地传递到液体内部任何一点, 这就是帕斯卡原理。

淹没在水下所有点都要符合式(1-6)表达的基本规律, 如果淹没在水下有任意 1、2 两点, 两点压强分别为 p_1 和 p_2 , 淹没水深分别为 h_1 和 h_2 , 则不难看出两点压强差为

$$p_1 - p_2 = \gamma(h_1 - h_2) \quad (1-7)$$

也就是说, 水下任意两点压强差为两点淹没水深的差值乘以水的容重。

1.1.4.2 静水压强基本方程的意义

以下主要从能量的角度对静水压强的基本方程加以说明。

对于如图 1-4 所示的容器, 围绕水深为 h_1 的 1 点取 dm 的水体, 则该水体的位置势能为 $dm g z_1$; 在水深为 h_1 的边壁上开个小孔, 在孔口连接垂直向上的开口玻璃管, 根据静水



压强基本方程,1点处的压强 $p_1 = \gamma h_1$,即 $h_1 = p_1/\gamma$,在压强的作用下,可以使质量为 dm 的水体上升 p_1/γ 的高度,这说明1点处的压强具有潜在的做功能力,称为压强势能,1点处的压强势能为 $dmgp_1/\gamma$,则位于1点处质量为 dm 的水体所具有的总势能为

$$dmgz_1 + dm\gamma \frac{p_1}{\gamma} = dm\gamma \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) \quad (1-8)$$

水利工程中常把单位重量的水体所具备的能量,称为单位能量,也叫水头,则1点处单位势能为

$$\frac{dmgz_1 + dm\gamma \frac{p_1}{\gamma}}{dm\gamma} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \quad (1-9)$$

式中 z_1 ——1点处单位重量的液体所具有的位置势能,叫单位位能,它又表示距离基准面的垂直高度,所以又称为位置水头;

p_1/γ ——1点处单位重量的液体所

具有的压强势能,叫单位压能,它又表示该点压强具备使水质点达到某个位置高度的能力,所以又称为压强水头;

$z_1 + p_1/\gamma$ ——水的总单位势能,又称为测压管水头,在工程中常用符号 $E_{势}$ 来表示。

$$E_{势} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = C \quad (1-10)$$

式(1-10)表明,仅在重力作用下的静止液体,各点的单位势能 $E_{势}$ 均相等。常数 C 的大小随基准面的位置而变,选定了基准面, C 值就确定了。式(1-10)说明水库中水面、水底、水中各点的单位势能均相等。因此,大坝越高,库容越大,储存的能量越大,将来可利用的能量越大,这就是修建高坝大库的原因。

由压强大小相等的点所构成的平面或曲面为等压面。由式(1-10)可以看出,仅在重力作用下静止液体中,位置高度相等的点压强大小相等,即等压面是水平面。也可以说,仅在重力作用的均质连通静止液体中,水平面为等压面,这就是连通器原理。

1.1.5 压强的单位

在水力学中,压强有三种单位,即应力单位、大气压和液柱高。

1.1.5.1 应力单位

应力单位是水力学分析与计算中的基本单位,用单位面积上的力来表示,单位为Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ 牛}/\text{米}^2 (1 \text{ N}/\text{m}^2)$,由于在水利工程中Pa是比较小的单位,所以还常用kPa、MPa表示, $1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

1.1.5.2 以大气压表示

地球表面大气所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

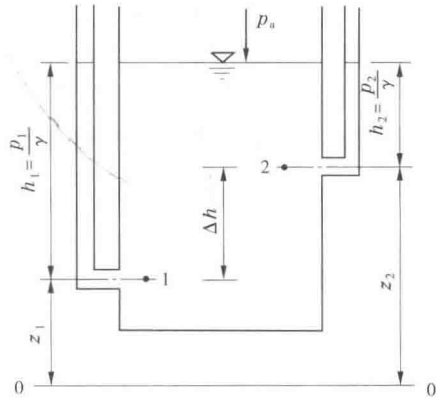


图 1-4