

省部级示范性高等职业院校重点专业建设规划教材

工程水力

水文学基础

主编 张智涌 潘 露
主审 刘建明 田明武



黄河水利出版社

省部级示范性高等职业院校重点专业建设规划教材

工程水力水文学基础

主 编	张智涌	潘 露
副主编	朱李英	王巧霞
	潘 妮	杨胜勇
主 审	刘建明	田明武

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是省部级示范性高等职业院校重点专业建设规划教材,是为适应现代高职教育培养应用型、技能型人才的需求,结合示范建设对专业改革发展的要求,按照教育部颁布的工程水力水文学基础课程标准编写完成的。本书共分为9个项目,主要内容包括:水静力学、水流运动的基本原理、有压管流运动、恒定明渠水流、过流建筑物的水力计算、水文循环及径流形成、水文统计的基本方法、年径流和多年平均输沙量的计算、设计洪水的分析计算。

本书为高职高专水利水电建筑工程、水利工程、水利工程监理、水利工程施工等专业的通用教材,也可作为其他专业教材或教学参考书,同时也可作为水利技术人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程水力水文学基础/张智涌,潘露主编. —郑州:黄河水利出版社,2014.8

省部级示范性高等职业院校重点专业建设规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0897 - 0

I. ①工… II. ①张… ②潘… III. ①水工建筑物 - 水力学 - 高等职业教育 - 教材 ②工程水文学 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TV135 ②TV12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 201511 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: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

字数:370千字

印数:1—2 000

版次:2014年8月第1版

印次:2014年8月第1次印刷

定价:35.00元



前言

本书是根据国家“十二五”教育发展规划纲要及《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》(2011 年中央 1 号文件)、《国家中长期教育改革和发展规划纲要》(2010~2020 年)、《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,按照现代水利职业教育要求,在总结水利类高等职业教育多年教学改革经验的基础上,在全国水利水电高职教研会指导下,结合示范建设对专业改革发展的要求编写的教材。

本套教材以学生能力培养为主线,融“教、学、练、做”为一体,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。

本书结合学院示范院校建设、新专业建设要求,本着理论够用,实践突出,体现现代水利新技术、新理念的原则,对水力学和工程水文学这两门专业基础课进行了有效整合,使专业课程内容结合更紧密、系统更完整。本书是在多年教学实践经验及原有讲义基础上,广泛吸收国内外教材中的优点,结合本校具体情况编写而成的。

本书结合最新技术规范及相关标准,根据现代水力水文计算要求,力求概念清晰,技术方法步骤清楚,深入浅出,强化实践,淡化理论,体现高等职业技术教育的特点,以学生为本,以培养学生的应用能力为主。

本书由四川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:潘妮编写第一次课、项目一、项目训练,朱李英编写项目二、项目五,杨胜勇编写项目三,张智涌编写项目四、项目六,潘露编写项目七、项目八,王巧霞编写项目九。本书由张智涌、潘露担任主编,张智涌负责全书统稿;由朱李英、王巧霞、潘妮、杨胜勇担任副主编;由刘建明、田明武担任主审。

在本书编写过程中,编者参阅了有关文献,特对相关文献的作者致以衷心的感谢!

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编者

2014 年 4 月



目 录

前 言

第一次课	(1)
项目一 水静力学	(3)
单元一 液体的主要物理性质	(3)
单元二 作用于液体上的力	(7)
单元三 静水压强及其特性	(8)
单元四 重力作用下静水压强的基本规律	(9)
单元五 作用于平面壁上的静水总压力	(16)
单元六 作用于曲面壁上的静水总压力	(22)
练习题	(25)
项目二 水流运动的基本原理	(29)
单元一 水流运动的基本概念	(29)
单元二 恒定总流连续性方程	(34)
单元三 恒定总流的能量方程	(35)
单元四 恒定总流的动量方程	(45)
单元五 水流型态与水头损失	(48)
练习题	(64)
项目三 有压管流运动	(67)
单元一 概 述	(67)
单元二 简单短管的水力计算	(69)
单元三 短管应用举例	(73)
单元四 简单长管的水力计算	(77)
练习题	(82)
项目四 恒定明渠水流	(84)
单元一 概 述	(84)
单元二 明渠均匀流计算公式及有关问题	(87)
单元三 明渠均匀流水力计算	(90)
单元四 明渠恒定非均匀流	(93)
单元五 水跃与水跌	(101)
单元六 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的定性分析	(109)
练习题	(116)

项目五 过流建筑物的水力计算	(117)
单元一 闸孔出流与堰流的概念	(117)
单元二 闸孔出流	(119)
单元三 堰 流	(124)
单元四 水工建筑物下游水流衔接与消能	(136)
练习题	(147)
项目六 水文循环及径流形成	(149)
单元一 水文循环	(149)
单元二 河流与流域	(150)
单元三 降 水	(153)
单元四 蒸发和下渗	(157)
单元五 径 流	(160)
单元六 流域水量平衡	(162)
练习题	(163)
项目七 水文统计的基本方法	(165)
单元一 概率、频率与重现期	(165)
单元二 随机变量及其概率分布	(167)
单元三 频率计算	(170)
练习题	(177)
项目八 年径流和多年平均输沙量的计算	(178)
单元一 概 述	(178)
单元二 具有长期实测资料时设计年径流的分析计算	(179)
单元三 缺乏实测资料时设计年径流的分析计算	(183)
单元四 枯水径流分析计算	(185)
单元五 河流多年平均输沙量的分析计算	(188)
练习题	(191)
项目九 设计洪水的分析计算	(193)
单元一 概 述	(193)
单元二 由流量资料推求设计洪水	(195)
单元三 由暴雨资料推求设计洪水	(204)
单元四 小流域设计洪水	(215)
练习题	(221)
项目训练	(223)
项目基本资料	(223)
行洪计算说明书编写要求	(226)
附 录	(227)
参考文献	(250)



第一次课

一、课程研究对象

工程水力水文学基础包括水力学和水文学两部分内容。

水力学是研究水(或其他液体)处于平衡和机械运用状态下的力学规律,并探讨运用这些规律解决工程实际问题的一门学科。它是一门技术学科,是力学的一个分支。水力学由水静力学和水动力学两大部分组成。水静力学研究的是液体的平衡规律,即当液体处于静止(或者相对静止)状态时的力学规律及其在工程实际中的应用;水动力学研究的是液体的运动规律,即当液体处于运动状态时作用于液体上的力与运动要素之间的关系,以及液体的运动特性与能量转换等。

水文学以水体作为主要研究对象,研究地球上水体的存在、循环和分布规律,探讨水体的物理和化学性质以及它们对环境的作用。本课程主要研究水循环的基本规律和径流形成过程的物理机制;根据长期实测和查水文资料,运用数理统计法预估未来长时期的水文情势,为水资源开发利用措施的设计、规划、施工和运用提供水文数据;在水文分析计算的基础上,综合研究水文情势、用水需要、调节方法等方面,针对水利工程的规模和工作情况,提出经济合理的决策。

二、课程任务

水力学的任务是研究液体处于平衡和机械运动下的各种基本规律,研究和提出利用这些基本规律来解决实际工程中所遇到的各种水力学问题的基本方法。

在水利工程的勘测、设计、施工和运行管理各个环节中,水力学都占有十分重要的地位。为了明确水力学的任务,我们以一个水资源综合利用的水利枢纽工程为例,来了解一下实际工程中常见的水力学问题。

为了满足防洪、灌溉、航运等各方面的要求,常在河道上筑坝以抬高上游水位形成水库,同时修建泄洪、通航、引水及输水建筑物、水电站等,组成水利枢纽。在规划时就必须分析自然河流的河势与天然水流形态,妥善布局每一个建筑物,正确确定水库的各种水位和下泄流量,合理设计引水、输水和泄洪建筑物过水断面的形状、尺寸,以充分利用水资源,发挥水资源最大效用。

在河道上筑坝后,坝上游水位将沿河道抬高形成水面曲线,导致河流两岸的农田等可能被淹没,必须依靠水力计算确定筑坝后水库的淹没范围,为移民和水库综合效应评估提供必要的依据。

水库蓄水后,大坝就会受到静水或动水压力的作用,在校核坝体稳定时,必须计算上下游水对坝体的水压力。在坝前水压力的作用下,水库中的水还会有部分沿坝基土壤或

岩石的缝隙向下游渗流,渗透对坝基的作用力也必须依靠水力计算来确定。

水库泄洪时,因溢流坝段上下游水位差一般较大,水流下泄时具有较大动能,必须采取有效措施,消除多余有害能量,防止或削弱高速水流对下游河床的冲刷,以确保建筑物安全。

以上简单地介绍了枢纽工程中的一些水力学问题。归纳起来,大致可以分为以下六个方面:一是水流对建筑物的作用力;二是水工建筑物的过水能力;三是水能利用和能量损失;四是河渠水面线问题;五是水流型态及泄水建筑物下游水流的衔接消能问题;六是渗流问题。另外,还有高速水流中的掺气问题、气蚀、冲击波、涡流、水污染等问题。

工程水文学是将水文学知识应用于工程建设的一门学科。它主要研究与水利水电工程建设有关的水文问题,即为水利工程的规划设计、施工和管理运用提供有关暴雨、洪水、年径流、泥沙等方面的分析计算和预报的水文依据。对于水利水电工程来说,每一项工程在实施过程中都可划分为规划设计、施工、管理运用三个阶段。

在规划设计阶段,水文计算的主要任务是确定工程的规模。规模过大,造成工程投资上的浪费;过小,又使水资源不能充分利用,也是一种浪费。对于防洪措施如标准过低,还可能导致工程失事,造成工程本身和下游人民生命财产的巨大损失。在多沙河流兴建水利工程时,还需估算蓄水引水工程的泥沙淤积量,以便考虑延长工程寿命的措施。水利工程的使用期限一般为几十年甚至百年以上,规划设计时,必须知道控制水体在使用期间的水文情势。水文计算就是研究这类问题的学科。

在施工阶段,其任务即将规划设计的工程付诸实施。因而,在施工期间必须对水文情势有所了解。水利工程工期一般较长,往往需要一个季度甚至长达几年。对水文情势的了解应包括两个方面:一方面为了建设临时性建筑物如围堰、引水隧洞或渠道等,须预报整个施工期的天然来水情势,而通常的水文和气象预报,往往不能提供如此长期的预报,仍需通过水文计算来解决这个问题;另一方面,为了安排日常工作,也必须了解近期确切的水情,这就需要提供短期(如几天之内)的水文预告。水文预报是为解决这一类问题服务的。

在管理运用阶段,其主要任务在于使建成的工程充分发挥作用。为此,需要未来一定时期的水文情况,以便确定最经济合理的调度方案。此时需要由水文分析得到的长期平均情势结合水文预报的短期水情,从而提出最佳的调度运用方案。



项目一 水静力学

【学习内容】 液体的主要物理性质;作用于液体上的力;静水压强及其特性;重力作用下静水压强的基本规律;作用于平面壁上的静水总压力;作用于曲面壁上的静水总压力。

自然界的物质一般有三种存在形式,即气体、液体和固体。固体由于其分子间距很小,黏聚力很大,所以能够保持固定的形状和体积,在外力作用下不易发生变形。液体和气体统称为流体,流体的分子间距较大,黏聚力小,在微小的剪切力的作用下易发生流动和变形,而不能保持固定的形状。

液体和气体的主要区别是在外力的作用下液体和气体的可压缩程度不同。液体不易被压缩,而气体易被压缩。水作为一种流体,在运动过程中表现出与固体不同的特点。

单元一 液体的主要物理性质

学习目标:掌握液体的基本特性,了解液体的惯性、黏滞性、压缩性以及表面张力等五个主要物理特性,掌握连续介质和理想液体的概念。

一、惯性、质量与密度

惯性是物体保持原有运动状态的性质。

物体惯性的大小用质量来表示,质量愈大的物体,惯性愈大,其反抗改变原有运动状态的能力就愈强。设物体的加速度为 a , 质量为 m , 则惯性力 F 为

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

式中 m ——质量, g 或 kg;

a ——加速度, m/s^2 。

对于均质液体来说,质量可用密度来表示,其计算公式为

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

式中 ρ ——密度, kg/m^3 或 g/cm^3 ;

V ——液体的体积, m^3 或 cm^3 。

同一液体密度随温度和压强变化,但变化甚小,一般可看成是常数。对于水而言,在一个标准大气压下,温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 。

二、液体的万有引力特性

万有引力特性是指运动物体之间相互吸引的性质。地球对物体的吸引力为重力或

重量。

重量用 G 来表示,重量的单位为 N 或 kN 。对于质量为 m 的液体,其重量为

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

式中 g ——重力加速度,为简化计算,本书采用 9.8 m/s^2 。

对于均质液体,单位体积的重量为容重(重度或重率),其计算公式为

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

式中 γ ——液体的容重, N/m^3 或 kN/m^3 。

容重与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

在水力学中,一般水的容重为 9.8 kN/m^3 ;水银的容重为 133.3 kN/m^3 。

三、黏滞性与黏滞系数

(一) 黏滞性

液体在运动状态下,利用内摩擦力来抵抗剪切变形的性质称为液体的黏滞性。黏滞性在液体运动时才显示出来,即静止时液体不能承受切力来抵抗剪切变形。

(二) 牛顿内摩擦定律及黏滞系数

为了说明黏滞性的存在对水流的影响,现以明渠水流为例予以说明。当渠道中的水流作直线运动,且液体质点是有规则的分层流动、不相互混掺时,测得其垂线上的流速分布如图 1-1 所示。在渠道底部,由于黏滞性的存在,水流与边壁之间存在着附着力,液体质点的速度为零;距渠道愈远流速愈大,当忽略表面张力的影响时,自由表面的流速最大。垂线上各点的流速不等,表明液体内部流层间存在着相对运动。

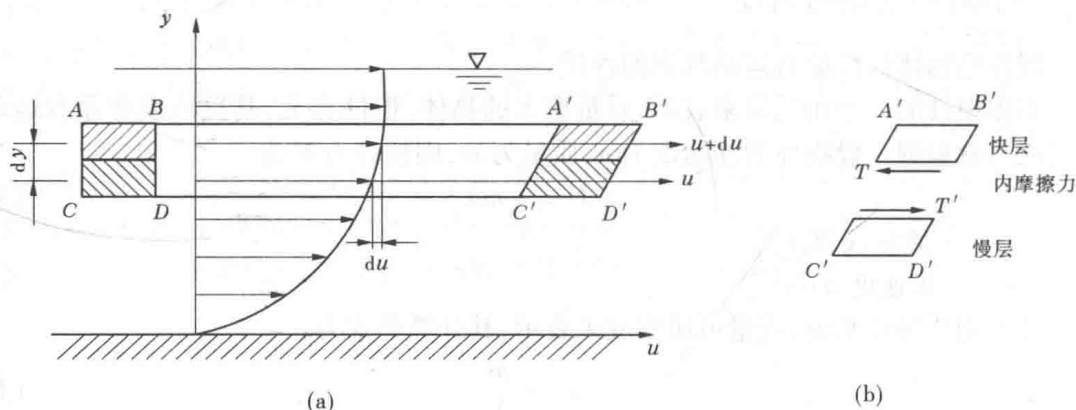


图 1-1

流层间的相对运动一经形成后,快层的质点将带动慢层的质点,从而在相邻流层的接触面上产生成对的内摩擦力,如图 1-1(b) 所示的快慢接触面上的 T 和 T' ,它们大小相等,方向相反,作用在不同流层上。内摩擦力一方面作用于质点上使其发生剪切变形运动;另一方面,对于质点来说,它又是抵抗剪切变形运动的力。设如图 1-1(a) 所示的质团 $ABCD$ 上、下层中心处的流速分别为 $u + du$ 和 u 。因为两流层的速度不等,经 dt 时段后,质团变



形呈 $A'B'C'D'$ 形状,这种变形就是流层间的接触面上产生的内摩擦力作用的结果。内摩擦力的大小可由牛顿内摩擦定律确定,即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

单位面积上的摩擦力(黏滞切应力)为

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 T ——内摩擦力;

A ——相对流层所接触的面积;

μ ——动力黏滞系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\frac{du}{dy}$ ——水流流速沿水深的变化率。

式(1-6)、式(1-7)为牛顿内摩擦定律。它表明液体内摩擦力的大小与液体的性质和温度有关,与流速无关,与流速梯度有关,与接触面面积大小成正比,与正压力无关。

μ 与液体的种类和温度有关,见表 1-1(主要为水的)。

表 1-1 不同温度条件下水的物理性质

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	容重 γ (kN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	动力黏滞系数 μ ($\times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏滞系数 ν ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	体积压缩系数 β ($\times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495	0.075 6
4	9.800	1 000.0	1.518	1.519	0.485	0.074 9
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.450	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483	0.058 9

从表 1-1 可看出: t 越大 μ 越小, μ 越大黏滞性越大。水力学中,液体的黏滞性还可以用 $\nu = \frac{\rho}{\mu}$, 为运动黏滞系数,单位为 m^2/s 或 cm^2/s 。

— 设水温为 t , 以 $^{\circ}\text{C}$ 计, 水的运动黏滞系数的计算公式为

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-8)$$

式(1-8)中 ν 的单位为 cm^2/s 。

牛顿内摩擦定律只适用于牛顿液体(油、酒精、水银),对于非牛顿液体(血浆、泥浆、牙膏等)将用另外的公式进行计算。

四、液体的压缩性

液体不能承受拉力,只能承受压力,抵抗体积压缩变形,当压力除去后又恢复原形,消除变形。液体具有的这种性质称为液体的压缩性,也称为弹性。

液体的压缩性可以用体积压缩系数 β 来表示。设质量一定的液体,其体积为 V ,当压强增加 dp 时,体积相应减小 dV ,其体积的相对压缩值为 $\frac{dV}{V}$,则体积压缩系数为

$$\beta = \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-9)$$

体积压缩系数的单位为 m^2/N 或 Pa^{-1} 。

在材料力学中,弹性系数的一般定义为应力与应变之比。若用 K 表示液体的体积弹性系数,可见体积压缩系数的倒数就是体积弹性系数,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-10)$$

体积弹性系数的单位为 N/m^2 或 Pa 。

液体的体积压缩系数和体积弹性系数与液体性质有关,同一种液体的体积压缩系数和体积弹性系数随温度和压强变化而变化,但变化不大,一般视为常数。在实际应用中,除特殊问题,一般我们认为液体是不可以压缩的。

五、液体的表面张力特性

表面张力特性是指液体自由表面存在微小张力的性质,这是一种局部水力现象。表面张力不仅存在于液体的自由表面上,也存在于不相混合的两层液体之间的接触面上。水利工程中所接触的水面一般较大,故在水力学问题中,一般不考虑表面张力的影响。

在水力学试验中,经常使用玻璃管(测压管)测量水压强或水面高度,当玻璃内径比较小时,则需要考虑由于表面张力引起的毛细管现象所造成的影响,如图 1-2 所示。

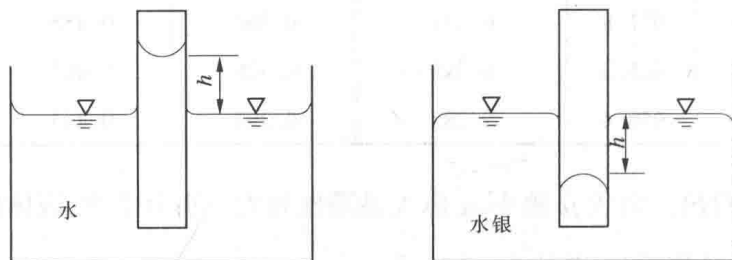


图 1-2



以上介绍的五种物理性质,都在不同程度上影响和决定着液体的运动,但每一种性质的影响程度并不是相同的。就一般而论,液体的压缩性和表面张力特性只对某些特殊水流运动产生影响,所以只在特殊情况下考虑,而前三种性质对液体运动的影响起着重要作用。

六、连续介质和理想液体的概念

(一) 连续介质

液体的真实结构是由运动着的分子组成,水分子与水分子之间存在空隙,如果按实际情况去研究,是相当困难的。由于水力学是为工程服务的,不需要研究水分子的运动(微观运动)情况,只需研究宏观的机械运动,而分子间的空隙与研究的范围相比小得多,在水力学研究中,将液体假设成一种由无数没有微观运动的质点所组成且毫无空隙地充满所占据的空间的连续体——这种抽象化的液体模型即为 1753 年由欧拉提出来的连续介质假说。

在连续介质假说的基础上,可以把液体看成是密度分布均匀的,各部分和各方向的物理性质都是均质的和各向同性的。

有了连续介质的概念,就可以用数学中的连续函数理论来研究液体的运动。

实践表明连续介质假说条件下所得到的结论与客观实际十分相符,完全能够满足工程实际需要。因此,一般的水力学问题都是以连续介质假说作为基础的。

(二) 理想液体

由于实际液体存在黏滞性,而且对液体运动的影响较为复杂,确定起来是很困难的,为简化方便,提出理想液体的概念。所谓理想液体,就是将水看成是不可压缩的、不能膨胀、没有黏滞性和表面张力的连续性介质。由于实际液体的压缩性、膨胀性和表面张力均很小,与理想液体差别不大,但黏滞性是否存在则是理想液体与实际液体的最重要的差别。研究问题时一般先按理想液体考虑,得出结论,再按实际液体考虑,修正黏滞性的影响带来的偏差。

■ 单元二 作用于液体上的力

学习目标:掌握质量力和表面力的概念,了解两种力的分类。

液体无论在平衡(静止)或运动状态,均受各种力的作用,按其物理性质有惯性力、重力、摩擦力、弹性力和表面张力等。在水力学中按其作用形式和特性可分为表面力和质量力两种。

一、表面力

表面力指作用在液体表面上,其大小与受作用液体的表面积成比例的力。其代表力有液体接触面上产生的水压力、固体边界与液体之间的摩擦力等。

按面积力与作用面之间的关系,表面力可以分为垂直作用的压力和平行作用的切力

两种。表面力的大小除用总作用力来度量外,还常用单位面积上所受到的力(应力)来表示。垂直指向作用面的应力称为压应力或压强,与作用面平行的应力称为切应力。

二、质量力

质量力作用在研究液体的每一个质点上,其大小与液体质量成正比。如惯性力、重力等均属质量力。对于均质液体而言,因液体的质量与其体积成正比,所以又叫体积力。与表面力一样,质量力的大小也可以用单位质量液体上所受的质量力来度量,这种单位质量液体上所受的质量力称为单位质量力,以符号 f 表示。设质量为 m 的液体,其上所作用的总质量力为 F ,则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-11)$$

若总质量力 F 在各个坐标轴上的投影为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力在 X 、 Y 、 Z 坐标轴上的投影为

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{m} \\ Y &= \frac{F_y}{m} \\ Z &= \frac{F_z}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

如取 Z 轴与铅垂方向一致且规定向上为正,则作用于单位质量液体上的重力在各坐标的分力为: $X=0$, $Y=0$, $Z = -mg/m = -g$ 。

■ 单元三 静水压强及其特性

学习目标: 理解静水压强的定义,了解静水压强的垂直性和等值性。

一、静水压强的定义

静止液体对于其接触的壁面有压力作用,如水对闸门、大坝坝面、水池池壁及池底都有水压力的作用。在液体内部,一部分液体对相邻的另一部分液体也有压力的作用。静止液体作用在与之接触的表面上压力称为静水压力,常用 P 表示,受压面积常用 A 表示。

在图 1-3 上,围绕 N 点取微小面积 ΔA ,作用在 ΔA 上的静水压力为 ΔP ,则 ΔA 面上单位面积所受的平均静水压力为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-13)$$

$\bar{p}$ 称为 ΔA 面上的平均静水压强,它表示 ΔA 面上受力的平均值,只有在受力均匀的情况下,才真实反映受压面上各点的水压力状态。通常受压面上的受力是不均匀的,所以

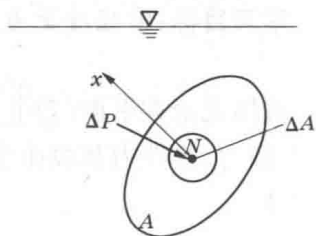


图 1-3

必须建立点静水压强的概念。

在图 1-3 中,当 ΔA 无限缩小趋于 N 点,即 ΔA 趋于 0 时,比值 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 趋于某一极限值,该极值即为 N 点的静水压强,静水压强用 p 表示。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-14)$$

静水压力的单位为牛(N)或千牛(kN),静水压强的单位为牛/米²(N/m²)或千牛/米²(kN/m²)。牛/米² 又称帕斯卡(Pa)。

二、静水压强的特性

(一) 静水压强的垂直性

静水压强的方向与受压面垂直并指向受压面。证明:在静止液体中取出一块水体 M ,如图 1-4 所示。用 $N-N$ 面将其分割成 I、II 两部分。取出第 II 部分为脱离体,在 $N-N$ 面上任取一点 A 。

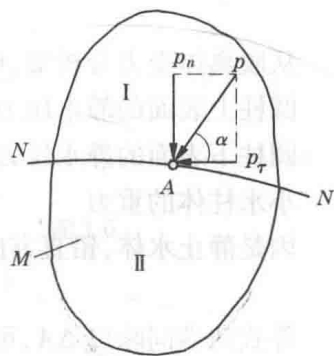


图 1-4

假如其所受静水压强 p 的方向是任意方向,则 p 可以分解成法向力 p_n 和切向力 p_τ 。由液体的性质知:静止液体不能承受剪切力,也不能承受拉力, p_τ 的存在必然会使 A 点的液体 $N-N$ 面运动,这与静水的前提不符,故 p_τ 只能为 0。同理,如 p_n 不是指向受压面,而是背向受压面,则液体将受到拉力,静止状态也要受到破坏,也与静水的前提不符,所以静水压强的方向只能垂直并指向受压面。

(二) 静水压强的等值性

静水中任何一点上各个方向的静水压强大小均相等,或者说其大小与作用面的方位无关。静水中各点压强的大小仅是空间坐标的函数,或者说仅随空间位置的变化而改变,即

$$p = p(x, y, z) \quad (1-15)$$

单元四 重力作用下静水压强的基本规律

学习目标:掌握静水压强的基本方程及其几何意义,了解等压面的概念及判别方法,掌握绝对压强、相对压强、真空压强的计算方法,了解静水压强的各种表示方法及测量仪器。

一、静水压强的基本方程

(一) 静水中任意两点间压强公式

如图 1-5 所示为通过力学分析的方法探讨静水压强的变化规律。在所受质量力仅有重力作用的静止液体中,研究位于水面下铅直线上任意两点 1、2 处压强 p_1 和 p_2 间的关系。围绕 1、2 两点分别取微小面积 ΔA ,取以 ΔA 为底面积、 Δh 为高的铅直小圆柱水体为

脱离体,因 ΔA 是微小面积,故可以认为其上各点的压强是相等的,如图 1-5(a) 所示。图中 p_0 为水表面压强; h_1 、 h_2 分别为 1、2 两点的水深; G 为小水柱的重量(重力)。

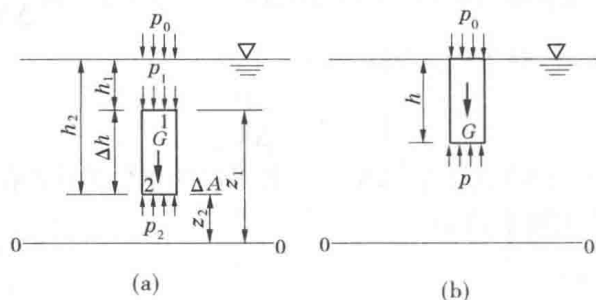


图 1-5

从脱离体受力分析知,铅直方向共受三个力:

圆柱上表面的静水压力 $P_1 = p_1 \Delta A$

圆柱下表面的静水压力 $P_2 = p_2 \Delta A$

小水柱体的重力 $G = \gamma \Delta A \Delta h$

因是静止水体,铅直方向合力必为 0,取向上方向为正,列力的平衡方程,得

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

等式两端同除以 ΔA ,可得任意两点静水压强的基本关系式为

$$p_2 = p_1 + \gamma \Delta h \quad (1-16)$$

式(1-16)表明,在质量力仅有重力作用的静水中,任意两点的静水压强关系为:下面一点的压强等于上面一点的压强加上水容重与两点之间的水深差的乘积;或者是上面一点的压强等于下面一点的压强减去水容重与两点之间的水深差的乘积(特殊情况下,如两点位于同一水平面, $\Delta h = 0$,则 $p_1 = p_2$)。显然,水深越大,压强越大。水深每增加 1 m,静水压强就增大 $\gamma \Delta h = 9.8 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} = 9.8 \text{ kN/m}^2$ 。

(二) 静水中任意一点压强公式

如把铅直小圆柱上表面移至上水面上,如图 1-5(b) 所示, $h_1 = 0$, $h_2 = \Delta h = h$, $p_1 = p_0$, $p_2 = p$,则式(1-16)可写成

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-17)$$

式(1-17)为常用的静水压强基本方程式,它表明:质量力仅有重力作用下的静水中任一点的静水压强,等于水面压强加上液体的容重与该点水深的乘积。

特别指出的是,当液体表面的压强 $p_0 = p_a$ (大气压)时,为简化计算,式(1-17)中的 p_0 按零计,即 $p_0 = p_a = 0$,只计算液体产生的压强,则静水压强方程式可写为

$$p = \gamma h \quad (1-18)$$

式(1-18)表明静水中任一点的压强与该点在水下淹没的深度呈线性关系。

(三) 静水压强第二表达式

我们也可以采用物理学中取基准面 0—0 的方法,来表示静水中任一点所处的位置。静水中任一点距 0—0 基准面的高度,称为该点的位置高度。式(1-16)中 $\Delta h = z_1 - z_2$,见图 1-6(a),可得

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

即

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (1-19)$$

式(1-19)是静水压强分布规律的另一表达形式。它表明在静水液体中,位置高度与压强的关系,即位置高度 z 愈小,静水压强愈大;位置高度 z 愈大,静水压强愈小。

二、静水压强方程式的意义

(一) 静水压强方程式的几何意义

在图1-6的容器中,任取两点1点和2点,在该高度边壁上开小孔并外接垂直向上的开口玻璃管,统称测压管,可看到各测压管均有水柱升起,测压管中的水面必升至与容器中的水面处于同一水平面。

因液体面上为大气压,故容器内1、2两点的静水压强分别为

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

因此,测压管中水面上升的高度

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

水力学中,通常称 z 为位置高度(或位置水头), $\frac{p}{\gamma}$ 为测压管高度(或压强水头), $z + \frac{p}{\gamma}$ 为测压管水头。

显然,图1-6中当0—0基准面确定后,水表面到0—0基准面的距离是不变的。因此,式(1-19)的几何意义在于:静止液体内任何一点的测压管水头等于常数(质量力仅为重力),即

$$z + \frac{p}{\gamma} = C \quad (1-20)$$

C值的大小,取决于基准面的选取,基准面选定,C值即确定。

式(1-20)也表明了连通器原理:均质、连通的静止液体中,水平面必是等压面,即 $z_1 = z_2$ 时,必然 $p_1 = p_2$ 。

(二) 静水压强方程式的物理意义

物理学中,质量为 m 的物体在高度为 z 的位置,具有的位置势能为 mgz 。同理,质量为 m 的液体在距0—0基准面高度为 z_1 的位置上,也具有位置势能 mgz_1 (见图1-6)。在研究液体时常取单位重量的液体作为研究对象,则单位重量的液体在某点所具有的位置势能简称单位位能,其表达式为

$$z_1 = \frac{mgz_1}{mg}$$

液体除具有位置势能外,其压力也具有做功的本领,称为压力势能,如图1-6所示。

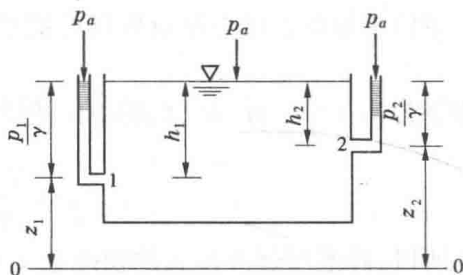


图 1-6