

华北水利水电学院水利职业学院
河南省郑州水利学校

课题组编写

水力学

S H U I L I X U E

$$\int_Q dQ = \int_{A_1} u_1 dA_1 = \int_{A_2} u_2 dA_2$$

$$\Sigma F = \rho Q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$



黄河水利出版社

水 力 学

华北水利水电学院水利职业学院
河南省郑州水利学校 课题组编写

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是为水利水电工程专业、水利工程专业编写的教材。全书共分十章,包括绪论,水静力学,水流运动的基本原理,水流型态及水头损失,有压管道中的恒定流,明渠恒定均匀流,明渠恒定非均匀流,堰流与闸孔出流,泄水建筑物下游水流衔接与消能简介,渗流基础。

本书适用于水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、水土保持、水电站建筑、治河与防洪等专业,并可用于成人专科学校以及普通本科院校的高等职业技术学院同类专业教学,还可供水利水电工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/华北水利水电学院水利职业学院,河南省郑州水利学校课题组编写. —郑州:黄河水利出版社,2005.8
ISBN 7-80621-885-8

I. 水… II. ①华… ②河… III. 水力学—高等学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 081054 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:yrpc@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1 092 mm 1/16

印张:14

字数:324 千字

印数:1—2 000

版次:2005 年 8 月第 1 版

印次:2005 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-885-8/TV·389

定价:22.00 元

前 言

2002年12月,华北水利水电学院水利职业学院、河南省郑州水利学校成立了课题组(组长:杜平原;副组长:王志凯;成员:邹季刚、李倩、郭广勇、朱海军、张凌杰、丁小霞、张萌、陶薇、廉东方、王美莲、张竞超、冯国华、张艳萍、吴超英),承担了全国教育教学“十五”规划国家重点课题《信息化进程中的教育技术发展研究》子课题“教育技术环境下《水力学》课程教学设计创新的研究”,经过两年多的努力,现已顺利结题,本教材是课题研究成果之一。

本教材是为高职高专院校的水利水电工程专业、水利工程专业所编写,亦可适用于水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、水土保持、水电站建筑、治河与防洪等专业,并可用于成人专科学校以及普通本科院校的高等职业技术学院同类专业,还可供水利水电工程技术人员参考。

本教材在编写过程中,力求概念清晰,深入浅出,联系实际,突出实用。全书内容都与课题研究的主要成果“水力学网络学习系统(网络版)”中的视频库、动画库、试题库、知识库四大数据库相配套,在教学内容设计方面体现了创新、以及适用于高职高专的教学特色。若将本教材结合网络学习系统讲授,在提高学生课堂学习效果方面会起事半功倍的效果。

参加本教材文字编写的有:李倩(第一、八、九章),朱海军(第二、五、七、十章),张竞超(第三、四、六章),全书由李倩、张竞超二位同志统、校稿,王志凯同志审定。书中带“*”部分为选讲内容,教师可以根据课时情况增减。

参加本教材网络课件制作的有:郭广勇(媒体合成),张凌杰(图片处理),丁小霞(动画设计),张萌、陶薇、冯国华(音像制作),李倩、朱海军(脚本撰写),王美莲(试验脚本撰写),邹季刚(审核)。

本教材在文字编写和课件制作过程中,得到了许多水力学同仁及计算机教师的关心和帮助,在此深表感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请广大读者对本书的缺点和错误予以批评指正。

为方便学生学习,我们提供辅助学生学习的“水力学网络学习系统”,发布在华北水利水电学院水利职业学院网站的水力学区 <http://slx.zzslxx.com> 中。联系方式为 admin@zzslxx.com。

教材编审组

2005年6月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 水力学的研究对象与任务.....	(1)
第二节 液体的基本特性及其主要物理力学性质.....	(2)
第三节 连续介质假设与理想液体的概念.....	(6)
第四节 作用于液体上的力.....	(7)
第五节 水力学的研究方法.....	(8)
第二章 水静力学	(10)
第一节 静水压强及其特性	(10)
第二节 静水压强的基本规律	(12)
第三节 压强的单位和量测	(15)
第四节 作用于平面壁上的静水总压力	(18)
第五节 作用于曲面壁上的静水总压力	(23)
第三章 水流运动的基本原理	(31)
第一节 描述水流运动的两种方法	(31)
第二节 恒定总流的连续性方程	(34)
第三节 恒定总流的能量方程	(36)
第四节 能量方程的应用条件及注意点	(41)
第五节 恒定总流的动量方程	(48)
第四章 水流型态及水头损失	(63)
第一节 水头损失的类型及其与阻力的关系	(63)
第二节 水流运动的两种流态	(64)
第三节 液流的层流运动	(68)
第四节 紊流运动	(71)
第五节 沿程水头损失的分析和计算	(76)
第六节 局部水头损失的分析与计算	(81)
第五章 有压管道中的恒定流	(90)
第一节 概 述	(90)
第二节 简单短管的水力计算	(91)
第三节 短管应用举例	(95)
第四节 长管的水力计算简介*	(100)
第五节 水击现象简介*	(101)
第六章 明渠恒定均匀流	(109)
第一节 明渠均匀流概述.....	(109)
第二节 明渠均匀流的基本特性及产生条件.....	(111)

第三节 明渠均匀流的计算公式及有关问题·····	(112)
第四节 渠道水力计算的类型·····	(117)
第七章 明渠恒定非均匀流 ·····	(124)
第一节 概 述·····	(124)
第二节 明渠非均匀流的一些基本概念·····	(125)
第三节 水跌与水跃·····	(131)
第四节 明渠恒定非均匀渐变流基本方程式·····	(137)
第五节 棱柱体渠道中非均匀渐变流水面曲线的分析·····	(138)
第六节 棱柱体渠道中非均匀渐变流水面曲线的计算·····	(144)
第七节 弯道水流简介* ·····	(149)
第八章 堰流与闸孔出流 ·····	(155)
第一节 概 述·····	(155)
第二节 孔口与管嘴出流* ·····	(156)
第三节 闸孔出流·····	(161)
第四节 堰 流·····	(168)
第九章 泄水建筑物下游水流衔接与消能简介 ·····	(186)
第一节 概 述·····	(186)
第二节 底流式衔接与消能·····	(187)
第三节 挑流式消能的水力计算·····	(197)
第十章 渗流基础* ·····	(203)
第一节 渗流的基本概念·····	(203)
第二节 渗流的基本规律——达西定律·····	(206)
第三节 地下河槽中无压恒定渗流·····	(207)
第四节 水平不透水层上均质土坝的渗流计算·····	(209)
第五节 有压渗流的计算·····	(211)
附录 I 谢才系数 C 值表 ·····	(218)
附录 II 梯形断面明渠正常水深求解图 ·····	(219)
附录 III 梯形和矩形断面明渠底宽求解图 ·····	(220)
附录 IV 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图 ·····	(221)
附录 V 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 ·····	(222)
参考文献 ·····	(223)

第一章 绪 论

第一节 水力学的研究对象与任务

水力学是一门研究液体处于平衡和机械运动状态下的力学规律及其在生产实际中应用的一门科学。它研究的对象主要是水,在一定条件下,其运动规律也适用于气体。它的研究方法是理论分析和实践相结合。

水力学是一门技术科学,它是力学的一个分支,基本内容分为基础理论、基本应用和专门课题三个部分。基础理论是研究液体处于静止和运动状态下宏观的基本规律,本书包括水静力学、水流运动的基本原理、水流型态及水头损失三章。基本运用是指基本规律的运用,即在一些常见的水流问题中的应用,如有压管道中的恒定流、明渠均匀流和非均匀流、堰流和闸流。泄水建筑物下水流衔接与消能、渗流基础属专门课题。

水力学在水利水电工程建设中有着十分广泛的应用。水利工程的勘测、设计、施工和运行管理等方面都有大量的水力学问题,还有农田水利、水土保持、河道整治、机电排灌、水力发电、给排水、水资源、环境保护及港口工程等,都需要水力学知识作为基础。在土建、机械、化学、冶金、采矿、能源等工程中,水力学也有广泛的应用。

在进行水利水电建设中要通过修建各种水工建筑物来控制、调整和改变原有的水流状态,使其符合人们的需要。例如,如果在河道中修建拦河闸,控制河道水流,抬高水位,以满足农田灌溉、工业用水、生活用水等要求,就必须计算需要多大的闸孔尺寸才能通过水闸的设计流量,要了解闸上游、下游水面的变化规律就需要进行水力分析计算;闸门关闭时水对闸门、闸底板和闸墩的静水作用力也需要计算;由于出闸流速很大,常在下游河床造成冲刷,要进行下游消能防冲以及闸底渗流计算等。又如水库蓄水之后,抬高了上游水位,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;验算坝体是否稳定,需要计算坝体承受的水压力;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,需要进行渗流计算等,这些都属于水力学应解答的问题。

综合上述分析,在水利水电工程中经常遇到的水力学问题,主要可概括为以下几个方面。

- (1) 水流对建筑物的作用力问题:确定闸门、坝身等水工建筑物所承受的静水压力、动水总作用力。
- (2) 建筑物的过流能力问题:输水和泄水建筑物以及管道、河渠过水能力的计算。
- (3) 水能利用和能量损失问题:分析水流能量转换过程中能量损失的规律,研究充分利用水流有效能量的方式、方法和高效消除高速水流中多余有害动能的消能防冲措施。
- (4) 河渠水面曲线分析与计算问题。

(5) 建筑物的渗流问题。

(6) 水工建筑物中水流型态问题:水流在各种水工建筑物中流动型态的判别及其对工程的影响等问题,以及如何改善水流型态,防止不利影响的问题。

需要指出的是,上述几个方面的问题并不是水力学的全部问题,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。学习水力学,不仅是掌握液体运动的各种基本规律,更重要的是要善于运用这些规律解决水利工程中各种水力学问题。

第二节 液体的基本特性及其主要物理力学性质

一、液体的基本特性

自然界的物质可分为固体、液体和气体三种存在形式。液体的基本特性主要是从力学的角度研究液体与固体、气体的区别。固体由于分子间距离小,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,以致在实际中它对切力和拉力几乎毫无抵抗能力,而只能抵抗对它压缩的力量。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,它可以任意扩散充满其所占据的有限空间,所以气体极易膨胀和压缩,流动性较大。液体与气体相比,液体的压缩性小,亦具有易流动性。从力学观点来看,易流动性就是不论如何微小的切力或拉力,一经作用于静止的液体时,则其原有的平衡状态即遭到破坏,而产生变形运动即流动。因为气体也具有流动性,所以液体、气体又统称为流体。

液体是由分子组成的。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,是不连续的、不均匀的。但是,详细研究分子间的微观运动,不是水力学的主要任务。水力学重点研究液体宏观机械运动,把液体的质点作为最小的研究对象。所谓液体质点,它是由许多分子组成的、无微观运动、体积很小可以忽略不计的小水团,它是水力学研究的液体的最小单位。所以,从宏观力学观点出发,液体可以看成是连续介质,这种连续介质的各种物理量,在各个方面随着空间和时间的变化都是连续的。在分析液体的平衡和运动时,可以用数学中的连续函数来表示液体的各种物理量(如压强、密度、流速等)。实践证明连续介质的假设是合理的。

总之,在水力学研究中的液体是一种容易流动、不易压缩、均质等向的连续介质。

二、液体的主要物理力学性质

液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要通过液体本身的性质来实现,所以在研究液体运动规律之前,必须对液体的主要物理性质有所了解。液体的物理性质是多方面的,下面我们着重讨论与液体运动有关的几种主要物理力学性质。

(一)液体与质量相关的性质

1. 液体的质量与密度

物体所具有的反抗改变原有运动状态的物理性质叫惯性,质量是物体惯性大小的度量。质量越大,惯性就愈大,运动状态就愈难改变。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

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

式中,负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。质量的标准单位为 g 或 kg ;加速度的单位为 m/s^2 。

液体单位体积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,其密度为

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

密度的单位是 kg/m^3 或 g/cm^3 。

2. 液体的重量和容重

在物理学中我们已知,物体之间相互具有吸引力的性质,称为万有引力特性。地球上的物体,都会受到地心引力的作用,这种地球对物体的引力称为重力,也叫物体的重量,用符号 G 表示。对于质量为 m 的物体,其重量为

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

式中, g 为重力加速度,国际计量委员会规定 $g = 9.806\,65m/s^2$ 为标准重力加速度,为简化计算,本教材采用 $g = 9.80m/s^2$;重力 G 的单位为 N 或 kN 。

液体单位体积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

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

容重的单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。

由式(1-3)和式(1-4),可得容重与密度的关系为

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

因为液体的体积随着温度和压强的变化而变化,故其容重与密度也将随之而发生变化,但变化很小,所以水力学中把水的容重和密度视为常数,因为一个标准大气压下 $4^\circ C$ 时水的容重为 $9.806\,65kN/m^3$,密度为 $1\,000kg/m^3$ 。在水力计算中,为简化计算,一般采用水的容重为 $9.80kN/m^3$,密度为 $1\,000kg/m^3$;水银的容重为 $133.3kN/m^3$ 。

【例 1-1】 求在一个大气压下,温度 $t = 4^\circ C$ 时, $1L$ 水的重量和质量。

解 已知水的体积 $V = 1L = 0.001m^3$,密度 $\rho = 1\,000kg/m^3$,容重 $\gamma = 9\,800N/m^3$ 。

由式(1-2)可得水的质量为

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

由式(1-4)可得水的重量为

$$G = \gamma V = 9\,800 \times 0.001 = 9.8(N)$$

(二) 液体的黏滯性

1. 黏滯性

液体在运动状态下, 流层间存在着相对运动, 从而产生内摩擦力(切力), 具有抵抗剪切变形的能力。液体这种产生内摩擦力, 具有抵抗剪切变形能力的特性, 称为液体的黏滯性。黏滯性只有在液体内部质点与质点或流层与流层之间存在相对运动时才显示出来, 液体运动一旦停止, 这种切力就立即消失。因此, 黏滯性在液体静止或平衡时是不显示作用的。也就是说, 静止或平衡状态下的液体是不能承受切力来抵抗剪切变形的。

2. 牛顿内摩擦定律及黏滯系数

为了说明黏滯性的存在对水流运动的影响, 现以明渠水流为例予以说明。当渠道中的水流做直线运动, 且液体质点是有规则的分层流动不相互掺混时(这种流动称为“层流运动”, 将在后续有关章节中予以讨论), 测得其垂线上的流速分布如图 1-1(a) 所示。在渠道底部, 由于黏滯性的存在, 水流与边壁之间存在着附着力, 液体质点的速度为零; 距渠底愈远流速愈大, 当忽略表面张力的影响时, 自由表面上的流速最大。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。

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、慢层接触面上的 T 与 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, 对液体质点来说, 它又是企图抵抗剪切变形运动的力。设图 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, 这种变形就是因为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

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

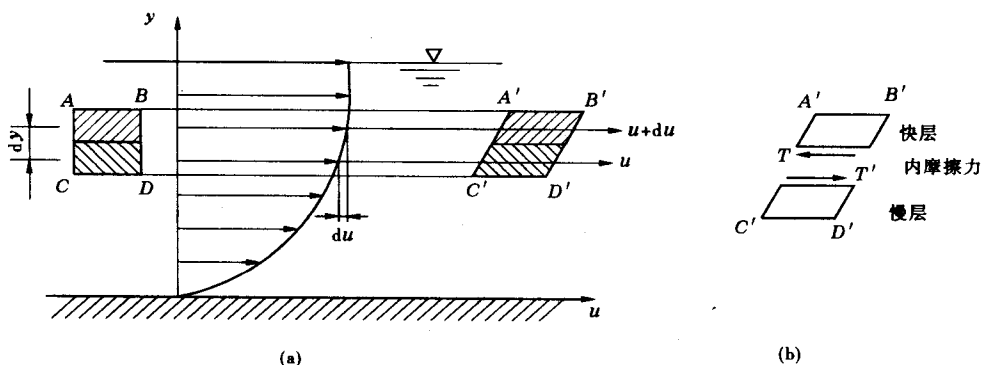


图 1-1

单位面积上的内摩擦力称为黏滯切应力, 用 τ 表示, 即

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

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

A ——相邻流层间接触面的面积；

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度，它反映流速沿 y 方向的变化率。

式(1-6)或式(1-7)称为牛顿内摩擦定律。式(1-7)表明切应力与流速梯度呈线性关系。

动力黏滞系数 μ 值与液体的性质和温度有关，它反映了液体的性质对内摩擦力的影响，是度量液体黏滞性大小的物理量。 μ 值大的黏滞性大， μ 值小的黏滞性小。

在水力学中，液体的黏滞性还可采用另一种形式的黏滞系数， $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 来描述， ν 称为运动黏滞系数，其单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。

设水温为 t ，以 $^{\circ}\text{C}$ 计，水的运动黏滞系数可用下述经验公式求得

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

式中， ν 的单位为 cm^2/s 。不同温度条件下水的 μ 值和 ν 值如表 1-1 所示。

表 1-1 不同温度条件下水的 μ 值和 ν 值

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	容重 γ (kN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	动力黏滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动黏滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	压缩系数 β ($10^{-9}1/\text{Pa}$)	弹性系数 K (10^9Pa)	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

应当指出，牛顿内摩擦定律只适用于切应力与流速梯度呈线性关系（即作层流运动）的“牛顿液体”（如水、某些油类、酒精、水银等）。对于非层流状态下的“牛顿液体”或“非牛顿液体”（如泥浆、血浆、牙膏、橡胶、尼龙以及生面团、浓淀粉糊等），其内摩擦力的计算将更为复杂，考虑到水利类各专业的特点，本书对此不予讨论。

（三）液体的压缩性

物体在外力作用下产生变形，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,当压力除去后能恢复原状,所以这种性质称为液体的压缩性或弹性。简言之,液体在压力作用下体积缩小的特性,称为液体的压缩性。

液体压缩性的大小,以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 表示。 β 值等于液体体积的相对压缩量 $\frac{dV}{V}$ 与液体压强的增值 dp 之比。由于体积随压强的增大而减小,故 $\frac{dV}{V}$ 与 dp 的符号相反, β 的表达式为

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

不难看出, β 值愈大,液体愈易压缩。

体积弹性系数 K ,其值愈大,液体愈不易压缩, K 的表达式为

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

式中, $\frac{dV}{V}$ 是一个比值,因而 K 和 p 的单位相同,为 N/m^2 ; β 的单位为 m^2/N 或 $1/Pa$ 。

不同种类液体的 β 值和 K 值不等,同一种类液体的 β 值和 K 值随温度和压强的变化而改变,但变化甚微,一般可视为常数。水的可压缩性很小, $10^\circ C$ 时, $K = 2.10 \times 10^6 kN/m^2$ (表 1-1),由此可推算,每增加 1 个大气压,水体积的相对压缩量约为 $1/20\,000$ 。在一般情况下,可认为水是不可压缩的,在实际应用上已经足够精确。只有在个别情况下,才需要考虑弹性的影响。例如,对于水电站的高压输水管道,当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。

第三节 连续介质假设与理想液体的概念

一、连续介质假设

液体和其他物质一样,基本结构都是由分子所组成。由于分子间距的存在,分子与分子之间就具有一定的空隙。此外,组成液体的分子还在不停地进行着复杂的分子热运动,由于分子在空间分布上的不连续性和分子热运动在时间上的随机性,致使液体的各项物理量在空间和时间上均呈现不连续变化,给液体运动的研究带来了困难。

由于水力学主要是为工程服务的,所以并不需要研究液体分子的微观运动,而只需研究整个液流宏观的机械运动规律。同时,由于液体分子之间的空隙与我们所研究的液体范围相比要小得多,例如水在标准状态下,相邻的分子间距约为 $3 \times 10^{-8} cm$,可见水的分子间距是相当微小的。因此,在水力学的研究中,将液体假设成为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空间的连续体。这种抽象化了的液体模型,就是 1753 年由英国物理学家欧拉提出来的连续介质假设。

在连续介质假设的基础上,一般还认为液体是均质的,液体质点的物理性质在液体内部

部各部分和各方向上是相同的,即认为液体具有均匀等向性。

有了连续介质假设,则液体中的一切物理量(如速度、加速度、压强、密度等)均可视为空间坐标和时间的连续函数,这为运用高等数学中的连续函数理论来研究液体的运动规律提供了很大的方便。

长期的生产实践和科学试验证明,在连续介质假设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的需要。因此,在水力学的研究中,除某些特殊问题外,一般都是以连续介质假设为基础的。

二、理想液体的概念

通过前面对液体物理性质的讨论,我们已经知道,实际液体除存在其他一些物理性质外,还具有黏滞性、压缩性和表面张力特性,这些特性均不同程度地影响液体的运动。其中,黏滞性是液体最突出、最重要的物理特性,它对液体运动的影响极为复杂,也给用数学方法描述和研究液体的运动带来了很大的困难。为了简化问题,便于分析和研究,水力学引进了一种研究液体运动的简化模型——理想液体。理想液体就是指绝对不可压缩、不能膨胀、没有黏滞性、也没有表面张力特性的液体。这种液体与固体的性质相近,就可以把固体运动的规律引入到液体中去。显然,理想液体并不是实际液体,只是为了研究方便而引出的一种理想化的液流模型。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和实际液体最重要的差别。除了少数液流问题黏滞性的影响本来就很小,可作为理想液体来考虑外,一般按理想液体所得出的结论,在应用到实际液体时,均应考虑由黏滞性的影响而带来的偏差并加以修正。

第四节 作用于液体上的力

无论处于运动状态或平衡状态的液体,都受到力的作用。这些力从物理性质上可分为惯性力、重力、黏滞力、弹性力和表面张力等,如果按作用形式又可分为质量力和面积力两种。

一、质量力

质量力是由液体的质量而产生的作用力,它作用于液体的每个质点上,与液体的质量成比例,如惯性力、重力都属于质量力。对于均质液体,因质量和体积成正比,故质量力又称为体积力。作用于单位质量液体上的质量力,称为单位质量力,其单位是 m/s^2 。若液体的质量为 m ,作用于其上的质量力为 F ,则单位质量力 $f = \frac{F}{m}$ 。设质量力 F 在空间坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,单位质量力 f 在坐标轴上的投影为 X 、 Y 、 Z ,那么

$$X = \frac{F_x}{m} \quad Y = \frac{F_y}{m} \quad Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-11)$$

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轴上的分力为: $X = Y = 0, Z = -mg/m = -g$ 。

二、面积力

作用于液体表面上的力称为面积力,它与受作用的液体表面积成比例。面积力可以是外力,比如活塞对水的压力或大气对水面的压力等;也可以是内力,如相邻两部分液体,一部分对另一部分产生的水压力等。表面力可分为垂直作用面的压力和平行作用面的切力两种。单位面积上作用的表面力称为应力。垂直液体表面的应力称为压应力或压强,用符号 p 表示;平行液体表面的应力称为切应力,用 τ 表示。

第五节 水力学的研究方法

任何学科都有着自己的研究方法,并且,随着科学技术的发展,其研究方法也会不断的出新、进步。水力学的主要研究方法有以下几种。

一、理论分析法

以古典力学中机械运动的普遍原理为基础,应用严密的数理分析方法及相关理论,结合液体的特性,从而建立液流运动的基本规律,寻求其精确答案或近似精确答案,并通过生产实践进行检验、补充、发展和完善其理论体系。由于实际水流的多样性和复杂性,对于某些复杂的水流运动形式和复杂的边界条件,单靠理论分析方法往往难以求得解答。

二、试验研究法

由于水流运动的复杂性和水利水电工程的不重复性,生产实践会不断提出一些还不能完全用理论予以解决的水力学问题,这就需要借助科学试验。现阶段研究水力学问题所进行的科学试验主要有三种。

(一)原型观测

在野外或工程现场,用仪器设备直接观测水工建筑物或河渠中的水流运动要素和水流现象,为检验理论分析成果或总结某些基本规律提供依据。

(二)模型试验

在实验室内,将实际工程按一定的比例缩小成物理模型,并在模型上模拟相应的实际水流运动,从而得出模型水流的规律性,再把模型水流上的试验成果按一定的关系换算成实际水流的成果,为工程设计提供依据。在水力学中,模型试验通常可分为三种类型:

(1)比尺模型试验。根据实际水流的特点,按水力相似原理,依一定的比例尺将原型中的实际水流缩小为模型水流,进行试验,然后把模型上的试验成果,按照相似关系换算出原型的数值,以满足工程设计的需要。

(2)系统试验。有时因为野外观测受到某些条件的限制或某种水流的相似规律在理论上还没有建立起来,则可在实验室内小规模地造成某种水流运动来进行系统试验观测,从中找出实际水流的规律。

(3)模拟试验。根据水流和电流的相似性,用电流场来模拟水流场,进行水电比拟试验研究,从而找出水流的运动规律。

应该指出,理论分析法和试验研究法有着密切的辩证关系,如果没有试验研究相配合,理论分析所得结构的正确性就无法得以验证,也无法确定数学模型中的系数值。如果没有理论分析方法作为指导,设计试验方案,分析试验成果,建立经验或半经验理论公式等,试验分析法也无法进行。可见,二者是相互结合、相辅相成、不可分割的。

在水力学的试验研究中,为了找出水流运动的规律性,还必须使用一些分析方法,如量纲分析法、矛盾分析法以及其他数理分析方法等。运用这些分析手段,对试验所得到的资料进行分析处理,达到去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里,抓住水流运动的特点与力学本质,从而得出符合客观实际的水流运动规律。

三、数值计算法

近十几年来,随着计算机技术的不断发展,数值计算方法已成为水力学研究中的基本方法。在水力学的研究中,有时水流运动的基本方程和边界条件都比较复杂,当用常规的数理方法一般很难得到其理论解析解,而试验又受到客观条件的限制时,就往往需要运用数值计算方法来寻求其近似解,以满足工程实际的需要。所谓数值计算法,就是对水力学中由基本方程、边界条件、初始条件所构成的完整的数学模型,通过如有限差分、有限元及边界元等一些特定的计算方法,用计算机来求出其数学近似解。可见,数值计算法有时弥补了理论分析法和试验研究法的某些不足,为水力学的研究开辟了新的途径。

习 题 一

1-1 液体的基本特性是什么?

1-2 什么叫液体的黏滞性?“液体在静止状态下不存在黏滞性”,这种说法对吗?为什么?

1-3 什么叫连续介质?理想液体?它有什么实际意义?

1-4 酒精的密度是 $8\,000\text{N/m}^3$,它的容重是多少?

1-5 体积为 1.2m^3 的水银,它的重量和容重各为多少?

1-6 已知液体的密度为 997.0kg/m^3 ,其运动黏滞系数 $\nu = 0.893 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$,问其容重和动力黏滞系数各为多少?

1-7 两间距为 1.2mm 的水平平行板之间充满 $\gamma = 735\text{N/m}^3$ 的液体,上板固定,下板在 $\tau = 1.5\text{N/m}^2$ 的切应力作用下,以 $u = 0.45\text{m/s}$ 的速度平移,试求液体的动力黏滞系数 μ 和运动黏滞系数 ν 。

静水压强以小写英文字母 p 表示, 静水压强的单位为 N/m^2 或 kN/m^2 , 分别又称为 Pa 或 kPa。

二、静水压强的基本特性

静水压强有以下两个特性。

(一) 静水压强的方向垂直并指向受压面

在平衡液体中取出一块液体, 用任一平面 $N-N$ 将液体分为 I、II 两部分, 如图 2-2(a) 所示。取出下半部 II 为隔离体, 如图 2-2(b) 所示。切割面上的作用力就是两部分液体之间的相互作用力。设切割面上某点 K 所受的静水压强为 p , 若 p 不是垂直于切割面, 则 p 可分解为切向分量 p_t 和法向分量 p_n 。

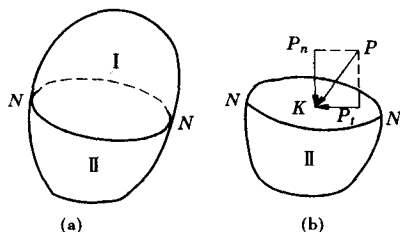


图 2-2

在第一章中已指出, 静止液体不能承受剪切力, 也不能承受拉力, 显然切向分量的存在将使 I、II 两部分发生剪切, 从而破坏液体的平衡。若 p 是指向作用面的外法线方向, 则 I、II 两部分将存在拉力, 液体平衡也将遭到破坏, 这和平衡液体的前提条件相矛盾, 所以 p 只能垂直且指向切割面。

(二) 任一点静止压强的大小和受压面的方位无关, 也就是说作用于同一点上各方向的静水压强的大小相等

设在平衡液体中, 以 O' 为顶点取一微小四面体 $O'ABC$, 为了便于分析, 令其三条棱边 dx 、 dy 、 dz 相互垂直并分别与 x 、 y 、 z 轴平行, 倾斜面为任意方向, 面积为 dA_n , 如图 2-3 所示。

下面对微小四面体进行受力分析。作用在微小四面体上的力有面积力和质量力, 首先分析面积力。

从静水压强的第一特性可知, 作用于微小四面体的面积力只有压力, 设作用于微小四面体三个相互垂直平面和斜面上的压强分别为 p_x 、 p_y 、 p_z 和 p_n , 由于是微小四面体, 可以认为各微小面积上的静水压强分布是均匀的, 作用在各个面上的静水压力等于各自面上的压强和相应面积的乘积, 即

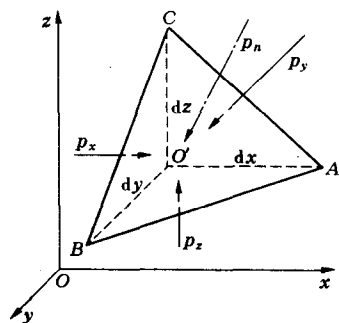


图 2-3

$$\left. \begin{aligned} dP_x &= p_x \frac{1}{2} dy dz \\ dP_y &= p_y \frac{1}{2} dx dz \\ dP_z &= p_z \frac{1}{2} dx dy \\ dP_n &= p_n dA_n \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

由几何学可知, 微小四面体的体积为 $\frac{1}{6} dx dy dz$, 质量为 $\frac{1}{6} \rho dx dy dz$ 。设单位质量力在 x 、 y 、 z 轴上的投影分别为 X 、 Y 、 Z , 则作用于微小四面体上的质量力 dF 在各坐标轴