

全国水利类高职高专教育统编教材

主 编 张小兵

副主编 何文学 韩 梅

水 力 学

SHUI LI XUE



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国水利类高职高专教育统编教材

水 力 学

主 编 张小兵

副主编 何文学 韩 梅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

水力学/张小兵主编. —北京: 中国水利水电出版社,
2004

全国水利类高职高专教育统编教材

ISBN 7-5084-1909-X

I. 水... II. 张... III. 水力学—高等学校: 技术
学校—教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 005133 号

书 名	全国水利类高职高专教育统编教材 水 力 学
作 者	主编 张小兵 副主编 何文学 韩 梅
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 21.25 印张 504 千字
版 次	2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—3100 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

内 容 提 要

本书为高等专科学校和高等职业技术学院水利工程建筑、农田水利、工程水文等专业的教材。全书共分十章，内容包括：绪论，水静力学，水动力学，液流型态和水头损失，有压管道流动和孔口、管嘴出流，明渠恒定均匀流，明渠恒定非均匀流，堰流和闸孔出流，泄水建筑物下游的水流衔接与消能，渗流。各章均编有例题、习题和常用图表。

本书也可作为水信息技术、水电站动力设备、给水排水、水利工程管理、道桥工程、工业与民用建筑、水土保持等专业的参考教材，也可供有关专业的工程技术人员参考。

全国水利类高职高专教育统编教材
编 辑 委 员 会

主任委员 王志锋

副主任委员 陈自强 王国仪

委 员 (按姓氏笔画排序)

王 锋 王庆河 刘宪亮 匡会健

孙敬华 孙晶辉 张俊峰 张朝晖

张耀先 陈良堤 欧阳菊根

茜平一 黄世钧

出版说明

为了加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年的时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,我们在组织各参研院校申报的基础上,经过认真遴选,确定了《水工建筑物》等20种教材作为第一批重点建设(其中8种被列为普通高等教育“十五”国家级规划教材)项目,进而在各参研院校和有关单位推荐人员中,遴选了富有高职高专教学经验的教师组成了写作班子,并对主要编审人员进行了集中培训,统一了高职高专教材编写的指导思想,进一步增强了特色和质量意识。在总结各校专业教学改革、课程和教材改革经验的基础上,着手编写教材。

这批教材的出版,集中反映了近年来高职高专水利类院校在专业改革、课程教学和教材建设等方面团结合作、互相配合、共同研究的最新成果。为了适应水利类专业新的形势需要,这批教材中相当部分是首次出版,填补了水利类高职高专教材建设中的空白。虽然有部分教材已经出版过多次,是在前人的基础上重新修订的,这次出版仍注入了大量的新内容、新成果。总之,这批教材的出版,将成为水利类高职高专院校教材建设的里程碑。

这批教材的出版,得到了各参研院校在人力、财力、物力上的大力支持,在此我们表示衷心的感谢。同时,对中国水利水电出版社的领导和编辑们精心组织,认真编排,从形式到内容上严格把关,我们也表示诚挚的谢意。

教育部高等学校水利学科教学指导委员会高职高专教学组

教育部《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》第Ⅱ22—1号项目:“高职高专教育水利类专业人才培养规格和课程体系改革、建设的研究与实践”项目组

2003年11月

前 言

本书是教育部“高职高专教育水利类专业人才培养规格和课程体系改革、建设的研究与实践”项目规划的系列教材。

根据高职高专的人才培养目标和教学特点,本着突出专业技术应用能力培养的原则,本书加强了针对性和实用性,第一章至第四章主要叙述水静力学、水动力学、液流型态和水头损失等水力学的基本概念和基本方法,第五章至第十章介绍有压管流、明渠流动、堰流和闸孔出流、泄水建筑物的消能、渗流等工程水力学问题。

全书由南昌水利水电高等专科学校张小兵主编(第一章、第五章、第七章、第三章第五节),浙江水利水电高等专科学校何学文(第四章、第八章)、黑龙江水利水电高等专科学校韩梅(第二章、第十章、第九章第四节)任副主编,参加编写的有广东水利职业技术学院张劲(第五章、第九章)、安徽水利职业技术学院陈明杰(第三章)。

本书由广东水利职业技术学院叶佩兰教授主审,他对本书体系的完善、重点的把握、内容的取舍都提出了许多宝贵意见,在此谨表示衷心感谢。

在本书编写过程中,参考并引用了有关院校编写的教材和生产科研单位的技术文献资料,在此亦致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,敬请专家和读者批评指正。

编 者

2003年12月

目 录

出版说明

前言

第一章 绪论	1
第一节 水力学的任务和研究方法	1
第二节 液体的主要物理性质	2
第三节 作用于液体上的力	7
习题	8
第二章 水静力学	9
第一节 静水压强及其特性	9
第二节 液体的平衡微分方程及其积分	11
第三节 重力作用下静水压强基本方程	14
第四节 静水压强的表示方法及意义	15
第五节 压强的单位及液柱式测压计	18
第六节 相对静止液体	23
第七节 作用于平面上的静水总压力	26
第八节 作用于曲面上的静水总压力	32
第九节 潜体的平衡与稳定	36
习题	37
第三章 水动力学	43
第一节 液体运动的基本概念	43
第二节 运动液体的分类	48
第三节 恒定总流的连续性方程	52
第四节 恒定流的能量方程式	54
第五节 特殊流动条件时的能量方程	63
第六节 恒定总流的动量方程	69
第七节 气穴与气蚀	75
习题	76
第四章 液流型态和水头损失	81
第一节 水头损失的物理概念及其分类	81
第二节 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	84

第三节	液流型态及其判别	86
第四节	圆管层流	89
第五节	计算沿程水头损失的通用公式	90
第六节	紊流的形成过程与基本特征	91
第七节	沿程阻力系数的变化规律	97
第八节	局部水头损失	104
	习题	110
第五章	有压管道流动和孔口、管嘴出流	112
第一节	概述	112
第二节	简单管道短管的水力计算	113
第三节	长管的水力计算	129
第四节	管网的水力计算	142
第五节	有压管道中的水击	149
第六节	孔口、管嘴恒定出流	170
	习题	176
第六章	明渠恒定均匀流	184
第一节	明渠水流的特点	184
第二节	明渠均匀流的基本特征和产生条件	186
第三节	明渠均匀流的水力计算	188
第四节	明渠均匀流水力计算中的几个问题	191
	习题	196
第七章	明渠恒定非均匀流	197
第一节	概述	197
第二节	明渠水流的流态	198
第三节	断面比能、临界水深与临界底坡	201
第四节	水跃	208
第五节	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程	217
第六节	棱柱体明渠中恒定非均匀渐变流水面曲线分析	220
第七节	明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	229
第八节	天然河道恒定流水面曲线的计算	238
第九节	明渠弯段水流	245
	习题	248
第八章	堰流和闸孔出流	252
第一节	概述	252
第二节	堰流的类型及水力计算公式	253
第三节	薄壁堰流的水力计算	255
第四节	实用堰流的水力计算	258

第五节	宽顶堰流的水力计算	265
第六节	其他堰流的水力计算	271
第七节	闸孔出流的水力计算	273
第八节	明流洞、涵的过流	280
习题		285
第九章	泄水建筑物下游的水流衔接与消能	286
第一节	泄水建筑物下游的水流衔接	286
第二节	底流式衔接与消能	288
第三节	挑流式衔接与消能	297
第四节	面流式衔接消能及寒区特有消能型式特点	303
习题		308
第十章	渗流	309
第一节	概述	309
第二节	渗流的基本定律——达西定律	311
第三节	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	314
第四节	地下河槽中非均匀渐变渗流的浸润曲线	316
第五节	集水廊道和井的渗流	320
第六节	水平不透水层上均质土坝的渗流计算	325
习题		327
参考文献		329

第一章 绪 论

第一节 水力学的任务和研究方法

一、水力学的任务和研究对象

水力学是属于应用力学的一门技术科学，它是人们在不断的科学研究及总结生产实践的基础上发展而来的。水力学的任务是研究液体（包括低速气体）的平衡和机械运动规律以及如何应用这些规律解决实际工程问题。它的研究对象是液体（主要是水）及可以忽略压缩性影响的低速气体。

水力学包括水静力学和水动力学两部分。水静力学主要研究液体处于静止或相对静止状态时的力学规律，如液体间的相互作用力，液体对固体边界的作用力等。水动力学主要研究的是液体处于运动状态时，作用于液体上的力与水力要素之间的关系，以及液体的运动特性和能量转换等。

液体是自然界的一种物质形态，它必然遵循物理学和理论力学中有关物体平衡及运动规律的原理。如力系平衡原理、动量定律、动能定理等。因此，物理学和理论力学的知识是学习水力学的基础。

水力学在水利建设及城市建设、交通运输等工业部门中有着广泛的应用。它的主要任务是研究水流和边界（如水工建筑物及管道等）的相互作用，分析在各种作用条件下所形成的水流现象及边界上各种力的作用，为工程的规划、设计、施工及运行管理提供合理的水力学依据。例如，为了满足防洪、发电和灌溉的需要，要在河道上修建大坝等水工建筑物拦蓄河水，形成水库。在水库蓄水后，大坝要承受很大的水压力，一部分水在水压力的作用下经坝基和两岸向坝下游渗透，而经泄水建筑物高速下泄的水流对下游河床常造成冲刷。因此，要正确地进行水工建筑物的设计，必须对有关的水力学问题，如水库水位及下泄流量、坝体受到的水压力及下泄水流对下游河床的冲刷作用、渗透水流对水工建筑物的作用等进行全面的分析与计算。

二、水力学的研究方法

水力学是建立在经典力学理论基础上的——门技术科学，它是为解决工程实际问题服务的。理论分析在建立液体运动的一般规律方面，已经比较成熟，但由于实际水流的多样性和复杂性，完全由理论分析的方法来解决还存在着较多困难。因此，水力学采用的研究方法是理论分析与实验研究紧密结合的方法。

分析液体运动是将机械运动的普遍原理与液体运动的具体特点相结合。由于液体运动的特性很复杂，在分析实际液体运动现象时，要考虑所有特性所引起的物理力是非常困难

的。因此必须结合实际问题的加以适当简化,即忽略一些对流动影响较小的次要因素,作出某些假定,抓住对流动起主要作用的特性及其所引起的物理力进行分析,可使数理分析过程及结果都较简单适用。对于一部分复杂的流动问题,即使简化后,数理分析依然很难得到所需要的结果。因此必须采用数理分析和实验观察成果相结合的方法。如先推导理论公式,再用系统实验所得的经验系数对其修正,甚至采用先定性分析后,完全由系统实验所得的结果——经验公式进行计算。

第二节 液体的主要物理性质

一、液体的基本特征

液体与气体和固体的主要区别是:液体具有一定大小的体积且容易流动,它不像气体那样没有固定的体积,能充满任何形状的容器,也不像固体那样能保持一定的形状。液体与固体一样,能承受较大的压力而不容易被压缩,气体则很容易被压缩。液体几乎不能承受拉力,而且在很小的切应力的作用下,立即产生连续不断的变形(流动)。

液体由不断进行复杂运动的分子组成,分子之间存在着距离,水力学只研究液体的宏观机械运动,并不研究液体分子的微观运动。从宏观力学的观点出发,将液体假定为由无数多的液体质点毫无空隙地充满它所占空间的连续体,即可将液体看做是连续介质。这样,在分析液体运动时,就可以利用连续函数这一数学工具来表示液体的各种物理量(如密度、流速、压强等)在液体内部的变化,这在应用上既方便又具有足够的精确性。

总之,在水力学中,液体的基本特征是容易流动的、不易压缩的连续介质。以水为代表的液体和低速气体都具有这些基本特征。

二、液体的主要物理性质

液体的平衡与运动,除了与作用于液体的外部因素有关外,更主要的是取决于液体自身的物理性质。任何一种力的作用,都要通过液体自身的物理性质来表现。所以在研究液体运动规律之前,必须对液体的物理性质有所了解。在水力学中,和液体运动有关的液体的主要物理性质有如下几个。

(一) 惯性——质量和密度

惯性是物体所具有的反抗改变原有运动状况的物理性质。惯性的大小以质量来度量,也就是物体中所含物质的多少。质量愈大的物体,惯性也愈大。当液体受外力作用使运动状态改变时,由于液体的惯性而引起的对外界抵抗的反作用力称为惯性力。

密度是指单位体积液体所含有的质量,以符号 ρ 表示。对于均质液体,设其体积为 V , 质量为 M , 则

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

密度的单位是公斤/米³ (kg/m³)。在一般的情况下,液体的密度随压强和温度的变化而变化,由于这种变化很小,所以水力学把液体的密度视为常数。例如水的密度,工程实际中是以在一个标准大气压强下,温度为4℃时的最大密度值作为计算值,其数值为1000kg/m³。不同温度下水的密度见表1-1。

(二) 万有引力特性——重量和容重

万有引力特性是指任何物体之间相互具有吸引力的性质, 这个吸引力称为万有引力。在液体运动中, 一般只需要考虑地球对液体的引力, 这个引力就是重力, 用重量 G 来表示。在研究液体所受的作用力时, 重力是一个很重要的力。设液体的质量为 M , 重力加速度为 g , 则重力为

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

重量 G 的数值单位为牛顿 (N)。

液体的容重是指单位体积液体所具有的重量, 用符号 γ 表示。对于均质液体, 设其体积为 V , 重量为 G , 则

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

或

$$\gamma = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-4)$$

g 的数值和纬度有关, 一般可看做常数, 计算时可取 9.8m/s^2 。容重的单位是牛顿/米³ (N/m^3) 或千牛顿/米³ (kN/m^3)。不同液体的容重是不同的, 同种一液体的容重随温度和压强而变化, 但这种变化很小, 一般工程上可视为常数。对于水, 用一个标准大气压下, 温度为 4°C 时的容重来计算, 此时 γ 为 9800N/m^3 , 或 9.8kN/m^3 。

水在不同温度时的容重值见表 1-1, 几种常见液体的容重值见表 1-2。

表 1-1 不同温度下水的物理性质

温 度 ($^\circ\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	容重 γ (kN/m^3)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 K (10^9N/m^2)
0	999.9	9.805	1.781	1.785	2.02
5	1000.0	9.807	1.518	1.519	2.06
10	999.7	9.804	1.307	1.306	2.10
15	999.1	9.798	1.139	1.139	2.15
20	998.2	9.789	1.005	1.003	2.18
25	997.0	9.777	0.890	0.893	2.22
30	995.7	9.764	0.792	0.800	2.25
40	992.2	9.730	0.653	0.658	2.28
50	988.0	9.689	0.547	0.553	2.29
60	983.2	9.642	0.466	0.474	2.28
70	977.8	9.589	0.404	0.413	2.25
80	971.8	9.530	0.354	0.364	2.20
90	965.3	9.466	0.315	0.326	2.14
100	958.4	9.399	0.282	0.294	2.07

表 1-2

几种常见液体的容重值 (标准大气压下)

液体名称	汽油	纯酒精	蒸馏水	海水	水银
容重 (N/m^3)	6664~7350	7778.3	9800	9996~10084	133280
测定温度 ($^{\circ}\text{C}$)	15	15	4	15	0

(三) 粘滞性——粘滞系数

液体具有易流动性, 静止时不能承受切力抵抗剪切变形。但当液体处于运动状态时, 由于各液体质点之间存在相对运动, 则质点间要产生内摩擦以抵抗其做相对运动。这种在运动状况下, 液体具有抵抗质点做相对运动的能力, 称为液体的粘性。在剪切变形过程中, 液体内部出现的成对切力称为内摩擦力或粘滞力。

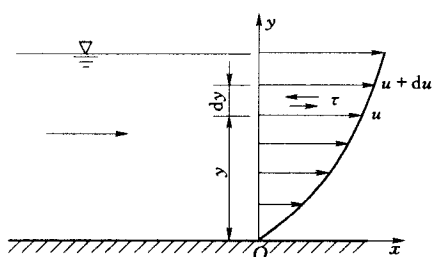


图 1-1

如图 1-1 所示, 液体沿一个固定平面壁做平行的直线运动, 且液体质点是有规则的一层一层向前运动而互不干扰混掺 (水力学称这种运动为“层流运动”, 在第四章将会详细讨论这种运动的特性)。由于液体具有粘性, 使得靠近壁面的质点流速较小, 远离壁面的质点流速较大, 即各个液层的流速大小是不同的, 其流速为抛物线形分布。若距平面壁 y 处的流速为 u , 在相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$, 由于两相邻液层的流速不同 (即存在

相对运动), 在两液层间将成对地产生内摩擦力。下面一层液体 (慢层) 对上面一层液体 (快层) 作用着一个与流速方向相反的内摩擦力, 其作用的结果是减缓上层的流动速度。而上面一层液体对于下面一层液体作用着一个与流动方向相同的内摩擦力, 其作用的结果是拖带较慢的下层液体流动。这两个内摩擦力大小相等, 方向相反, 都具有抵抗液体作相对运动的性质。

由牛顿 (Newton) 在 1686 年根据实验提出并经后人加以验证的牛顿内摩擦定律, 表明了液体内摩擦力的大小与两液层间的流速差成正比, 与两液层间的距离 dy 成反比, 同时也与液体的物理性质有关:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式中, 比例系数 μ 称为粘滞系数, 单位为牛顿·秒/米² ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$), 即帕斯卡秒 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

两液层间流速差与其距离的比值 $\frac{du}{dy}$ 称为流速梯度。

式 (1-5) 就是著名的牛顿内摩擦定律, 它可表述为: 做层流运动的液体, 相邻液层间单位面积上所作用的内摩擦力, 与流速梯度成正比, 同时也与液体的物理性质有关。

下面可以证明, 流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 的物理意义是液体微团的剪切变形速度。在图 1-1 中将相距为 dy 的两层液体 1—1 和 2—2 分离出来, 取一个矩形微分液体微团 ABCD 来研究, 见图 1-2。该微分体

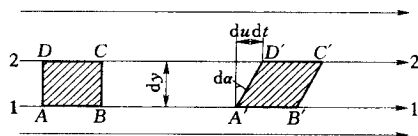


图 1-2

经过 dt 时段后将运动到新的位置 $A'B'C'D'$ ，因液层 2—2 的速度较液层 1—1 大 du ，则上层液体比下层液体多移动了一个距离 $ds = du dt$ ，即微分体除位置改变而产生平行移动外，还伴随着形状的改变，由原来的矩形变成了平行四边形，即产生了一个剪切变形。剪切变形的大小为 $d\alpha$ ，因 dt 为微分时段，则剪切变形 $d\alpha$ 亦为微分量，可认为

$$d\alpha \approx \operatorname{tg}(d\alpha) = \frac{du dt}{dy}$$

故

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

由上式可知，流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 表示液体的剪切变形速度（也称切应变率）。故牛顿内摩擦定律说明了液体的内摩擦力与切应变率成正比。

粘滞系数 μ 是量度液体粘滞性的指标， μ 值愈大的液体粘性亦愈大，同一种液体的 μ 值随温度和压强的变化而变化，压强对液体粘性的影响很小，在工程计算时可不考虑压强对液体粘性的影响。温度是影响粘滞系数的主要因素。当液体温度升高时，液体的分子内聚力减小，所以液体的粘滞系数随温度的增加而减少。液体粘滞性的大小还可以用另一种形式的粘滞系数 ν 来表示， ν 为粘滞系数 μ 与液体密度 ρ 的比值，即

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

ν 的单位为 m^2/s (m^2/s) 或 cm^2/s (cm^2/s)，具有运动学的要素，所以称为运动粘滞系数，而 μ 则称为动力粘滞系数。

不同温度时水的 μ 值和 ν 值与温度的关系见表 1-1，工程计算时也可采用以下经验公式：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-6)$$

液体的粘滞性是液体抵抗剪切变形时表现出来的一种性质，在液体处于静止时，不承受切力，故粘滞性的作用不显示出来。

由于液体的粘滞性，在液体运动时质点间存在相对运动，会产生内摩擦力。内摩擦力的作用将使得液体的机械能有一部分要克服内摩擦力而转化为热能逸散。因此，粘滞性是运动液体产生能量损失的根源。在研究液体运动时，必须考虑液体的粘滞性。但考虑粘滞性，将使水力学问题的分析研究异常复杂，对于某些水力学问题难以得出可实际应用的结果。因此，有时在研究液体运动时，先将液体作为无粘滞性的理想液体来分析研究，得到结果后再通过实验，对理想液体的结论与实际的偏差加以修正与补充。

【例 1-1】 有一平板在水面上以 $u = 2\text{m/s}$ 的速度作水平运动。已知水深 $h = 0.01\text{m}$ ，水温为 20°C ，由平板带动的水流流速按直线分布，如图 1-3 所示。求作用在平板底面的切应力。

解：按水温为 20°C ，由表 1-1 查得水的动力粘滞系数 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。平板与地面的流速差为 $du \approx \Delta u = 2 - 0 = 2\text{m/s}$ ， $dy = h = 0.01\text{m}$ 。代入式 (1-5) 得作用于平板底面的切应力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 1.005 \times 10^{-3} \times \frac{2}{0.01} = 0.201 \text{N}/\text{m}^2$$

(四) 压缩性和压缩系数

物体在外力作用下产生变形, 在外力撤除后能恢复原状消除变形的性质称为弹性。由于液体只能承受压力, 抵抗体积压缩变形, 并在撤除外力后能恢复原状, 因此这种性质叫压缩性。液体压缩性的大小以体积压缩系数 β 来表示, 而在工程中则往往用体积弹性系数 K 来表示。

液体体积压缩系数为

$$\beta = - \frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 表明体积压缩系数是液体体积的相对缩小值与压强的增值之比。式中负号是考虑到压强增大时, 液体体积缩小, 所以 dV 与 dp 的符号始终相反, 为保持 β 为正数, 加一个负号。 β 值愈大, 液体的压缩性亦愈大。 β 的单位为 $\text{米}^2/\text{牛顿}$ (m^2/N)。

体积弹性系数 K 是 β 的倒数, K 愈大液体愈不易被压缩, $K \rightarrow \infty$, 表示液体不可压缩。

$$K = \frac{1}{\beta} = - \frac{dp}{\frac{dV}{V}} \quad (1-8)$$

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

因为液体在压缩前后的质量 M 不变, 即 $M = \rho V = \text{常量}$, 则

$$dM = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

故

$$- \frac{V}{dV} = \frac{\rho}{d\rho}$$

将上式代入式 (1-8), 得

$$K = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 在水击计算中将用到。

液体的种类不同, 其 β 和 K 值也不同, 同一种液体的 β 和 K 值是随压强和温度而变化的, 不同温度下水的 K 值见表 1-1。由于这种变化很小, 如 10°C 时水的体积弹性系数 $K = 2.10 \times 10^{-9} \text{kN}/\text{m}^2$, 也就是说, 每增加一个大气压, 水的体积相对压缩值仅为二万分之一, 所以一般可看作常数, 即认为水是不可压缩的。这对绝大多数工程流动的问题来说具有足够的精确度, 但对某些压强变化过程非常迅速的流动问题, 则必须考虑水受压后的弹力作用。如有压管道中的水流, 在迅速关闭管路阀门时, 管道内的压力会突然急剧升高, 相应产生的弹性力对流动的影响就不能忽略。

三、液体的边界

液体的边界既有固体也有气体。例如, 渠道水流的水面为气体边界, 底部和两侧为固体边界。而充满管道的水流, 只有固体边界。下面讨论这两种边界对液体的影响。

(一) 固体边界

由于液体具有易流动性, 一般情况下, 必须在一定的固体边界约束下流动。特殊情况

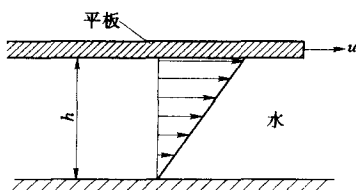


图 1-3

下的射流,才不受固体边界的约束。边界对液体的约束体现在其对液体有一定的作用力,若改变边界形状,边界对液体的作用力也相应改变,同时液体的运动状态也会相应改变。利用液体运动的这个特点,我们可以通过改变边界形状来达到控制液流的目的。各种水利工程都是改变水流原有状态的具体工程措施。例如,修筑渠道可以引水灌溉;在河中筑坝可以拦蓄河水,形成水库,以达到防洪、发电、灌溉和航运等目的;将溢流坝进口做成符合水流运动趋势的流线形状,可以减小边界对水流的阻力等。因此,固体边界是影响液体运动的一个重要因素。

(二) 气体边界

一般情况下,对液体运动的影响,气体边界要远远小于固体边界。但在某些情况下,气体边界对液体运动会产生显著影响。例如,表面和空气相接触的高速水流,由于会将大量的空气掺入水中,形成掺气水流,从而改变了原来纯水的运动状态;由溢流坝尾端挑射出的高速射流,因受空气的摩擦作用,使得射流水股在空中裂散,部分水流能量消耗于空中,从而减轻水流对下游河床的冲刷作用。

以上从液体的物理性质和液体边界等方面叙述了影响液体运动的因素,液体的物理性质是其自身固有的、无法改变的物理属性,而液体的边界(特别是固体边界)则是可以人为改变的可变因素。人们可以通过设计各种控制液流的建筑物,以改变液体原有的边界状况,并通过液体的物理性质而影响液体的运动状态,从而达到控制液流为人类服务的目的。

第三节 作用于液体上的力

液体无论处于平衡还是运动状态都受到各种力的作用,这些力按其物理性质来看有重力、惯性力、摩擦力等。水力学为便于分析液体的平衡状态或运动规律,将这些力按表现形式分为表面力和质量力两种。

一、表面力

表面力是作用于液体的表面上,并与受作用的液体表面积成比例的力。表面力又可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力(一般液体都不考虑较小的拉力)。

表面力的大小除用总作用力来度量以外,也常用单位面积上所受的表面力(即应力)来度量。设液体的面积为 A ,作用的压力为 P ,切力为 T ,则作用在单位面积上的平均压力(又称平均压强) p 为 $\frac{P}{A}$,作用在单位面积上的平均切应力 τ 为 $\frac{T}{A}$ 。由连续介质的概念取平均压强和平均切应力的极限值,引入点应力的概念,则压强和切应力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-10)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-11)$$

压强和切应力的单位为牛顿/平方米(N/m^2),即帕斯卡(Pa),简称帕。

二、质量力

质量力是作用在液体每一个质点上,并与受作用的液体质量成比例的力。例如重力和