

994179

·全国高等专科学校城镇建设试点专业系列教材

水 力 学

河北工程技术高等专科学校 齐清兰 编

3
中国水利水电出版社

994173

全国高等专科学校城镇建设试点专业系列教材

水 力 学

河北工程技术高等专科学校

齐清兰 编

陈阳生 主审

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书为高等专科学校市政工程、城镇建设、道桥工程和给水排水等专业的教材。全书共分十章,包括:绪论,水静力学,水动力学理论基础,流动型态及水头损失,孔口、管嘴出流和有压管路,明渠均匀流,明渠非均匀流,堰流及闸孔出流,渗流及水力学问题的数值计算方法简介等内容。各章编有例题、思考题、习题和常用图表。

本书也可作为水利工程、工业与民用建筑等专业的参考教材。并可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/齐清兰编. —北京:中国水利水电出版社, 1998.8

全国高等专科学校城镇建设试点专业系列教材

ISBN 7-80124-056-1

I. 水… II. 齐… III. 水力学-高等学校:专业学校-教材 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 05074 号

书 名	全国高等专科学校城镇建设试点专业系列教材 水 力 学
作 者	齐清兰 编
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:sale@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(2109),68345101(金五环)
经 售	全国各地新华书店
排版、印刷	北京市通州燕山印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 16.25印张 367千字
版 次	1998年7月第一版 1998年7月北京第一次印刷
印 数	0001—1900册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社金五环出版服务部负责调换

版权所有·翻印必究

序

为了进一步推进高等工程专科学校的教学改革和教材建设,探索高等工程技术应用性人才培养的专科教学模式,国家教育委员会已在全国普通高等工程专科教育各类院校中遴选了100余个工程专科专业,进行“小范围、大幅度”的专业教学改革试点。我校的城镇建设专业(市政工程专业方向)是国家教委批准确认的第三批高工专教学改革试点专业。为了办出专科特色,加大教学体系与教学内容的改革,构筑突出专业技术应用能力的培养的知识能力结构,我们组织本校一些具有较丰富教学经验和较高专业水平的教师,并邀请有关兄弟院校教师及工程技术单位的工程师参加,编写了这套系列教材。内容包括《建筑材料》、《工程力学》、《工程测量》、《水力学》、《土力学与地基基础》、《钢筋混凝土与砌体结构》、《电工与电气设备》、《水泵与水泵站》、《建设监理概论》、《道路工程》、《桥梁工程》、《给水工程》、《排水工程》、《水处理工程》、《城市规划》、《市政工程施工组织管理与概预算》、《环境保护概论》、《工程经济学》、《系统工程》和《专业英语》,以供本校及有关院校同类或相近的专科专业教学试用。

本系列教材在编写过程中,力求妥善处理学科知识的系统性、完整性和专业实践技能培养的关系,努力贯彻体现专科教材理论知识“必需、够用”为度的原则,着力突出专业技术应用能力的培养,力图实现城镇建设专业(市政工程专业方向)教学改革试点方案所要求的课程体系与教学内容的改革,使其具有专科教材针对性和实用性强的特色。努力做到基本概念与基本理论的阐述清晰、突出重点和讲究实用,基本技能与基本方法的训练得体、突出应用和讲究实际,并能充分反映近年来的新技术、新工艺、新成就。

本系列教材除作为高等工程专科学校城镇建设专业教材外,也可供其他相近专业和有关专业工程技术人员参考。但愿这一套系列教材能为城镇建设专业深化改革和加强教材建设提供有益的尝试,也希冀能对其他相近专业的改革的探索有所裨益。

限于编者的水平,这套教材难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

河北工程技术高等专科学校
教材建设委员会

1997年10月

24205 X01

前 言

本教材是根据普通高等工程专科城镇建设专业（市政工程专业方向）教学改革试点方案教材建设规划和学校教材建设委员会审定通过的《水力学》教学大纲与编写大纲要求而编写的。

根据专科学校的培养目标和教学特点，本着针对性、实用性强，突出专业技术应用能力培养的原则，《水力学》以讲述水力学基本概念、基本知识和基本方法为主要内容。重点介绍了水静力学，水动力学理论基础，流动型态及水头损失，孔口、管嘴出流和有压管路，明渠均匀流、非均匀流，堰流及闸孔出流，渗流等水力学问题。

本教材由齐清兰编写，陈阳生主审。

在本教材的编写过程中，得到了有关院校教师和生产科研单位技术人员的热忱帮助和鼎力支持，编者在此致以诚挚的谢意。同时，本教材还参考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，编者在此一并致谢。

限于时间仓促 和水平有限，书中的缺点和不妥之处敬请各校师生及其他读者给予指正。

编 者

1997年9月

目 录

序

前 言

第一章 绪论	1
第一节 水力学的任务及其历史的发展	1
第二节 液体的连续介质模型	2
第三节 液体的主要物理性质	2
第四节 作用在液体上的力	7
思考题	8
计算题	8
第二章 水静力学	9
第一节 静水压强及其特性	9
第二节 重力作用下静水压强的分布规律	12
第三节 测量压强的仪器	16
第四节 作用在平面上的静水总压力	20
第五节 作用在曲面上的静水总压力	25
思考题	29
计算题	30
第三章 水动力学理论基础	35
第一节 描述液体运动的两种方法	35
第二节 欧拉法的几个基本概念	37
第三节 恒定一元流的连续性方程	43
第四节 理想液体及实际液体恒定元流的能量方程	45
第五节 实际液体恒定总流的能量方程	49
第六节 总水头线和测压管水头线的绘制	56
第七节 实际液体恒定总流的动量方程	57
思考题	63
计算题	65
第四章 流动型态及水头损失	70
第一节 水头损失的物理概念及其分类	70
第二节 实际液体流动的两型态	72
第三节 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	76
第四节 圆管中的层流运动	78

第五节 液体的紊流运动	80
第六节 圆管中的紊流	84
第七节 圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素	88
第八节 计算沿程水头损失的经验公式——谢才公式	94
第九节 局部水头损失	96
思考题	103
计算题	105
第五章 孔口、管嘴出流和有压管路	108
第一节 液体经薄壁孔口的恒定出流	108
第二节 液体经管嘴的恒定出流	111
第三节 短管的水力计算	113
第四节 长管的水力计算	125
第五节 管网水力计算基础	135
第六节 有压管路中的水击	140
思考题	147
计算题	148
第六章 明渠均匀流	153
第一节 概述	153
第二节 明渠均匀流的计算公式	155
第三节 明渠水力最优断面和允许流速	156
第四节 明渠均匀流水力计算的基本问题	160
第五节 无压圆管均匀流的水力计算	164
第六节 复式断面渠道的水力计算	167
思考题	169
计算题	170
第七章 明渠非均匀流	172
第一节 概述	172
第二节 断面单位能量和临界水深	173
第三节 缓流、急流、临界流及其判别准则	176
第四节 水跃	178
第五节 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	183
第六节 棱柱形渠道恒定非均匀渐变流水面曲线的分析	184
第七节 明渠水面曲线的计算	192
第八节 天然河道中水面曲线计算简介	199
思考题	200
计算题	202
第八章 堰流及闸孔出流	205

第一节 堰流的定义及其分类	205
第二节 堰流的基本公式	206
第三节 薄壁堰	207
第四节 实用堰	210
第五节 宽顶堰	211
第六节 宽顶堰理论的应用——小桥孔径的水力计算	216
第七节 闸下出流	219
第八节 水流衔接和消能	220
思考题	226
计算题	227
第九章 渗流	228
第一节 概述	228
第二节 渗流基本定律	229
第三节 地下水的均匀流和非均匀流	232
第四节 井和集水廊道	236
思考题	242
计算题	242
第十章 水力学问题的数值计算方法简介	244
附录 1 各种不同粗糙面的粗糙系数 n	248
附录 2 谢才系数 C 的数值表	248
附录 3 梯形渠道水力计算图解	250
主要参考文献	252

第一章 绪 论

第一节 水力学的任务及其历史的发展

水力学是用实验和理论分析的方法来研究液体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门科学。在一定的条件下,其运动规律也适用于气体。本书主要是探讨液体的运动。

在地球上,物质存在的主要形式是固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。从力学分析的意义上看,流体和固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体有能力抵抗一定数量的拉力、压力和剪切力,相应的科学是材料力学、弹性力学等;而流体几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪切力,即流体在很小剪切力的作用下将发生连续不断的变形,直到剪切力消失为止。流体的这种特性称为易流动性。至于气体与液体的差别在于气体易于压缩,而液体难于压缩。由于液体所具有的物理力学特性与固体和气体不同,在历史的发展中,逐渐形成了水力学这样一门独立的科学。

水力学的萌芽,人们认为是从距今约 2000 多年前西西里岛上的阿基米德写的“论浮体”一文开始的。他对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。而这些实际知识也早已在我国、印度、埃及等国家里,由劳动人民累积起来。

15 世纪中叶至 18 世纪下半叶,生产力有了很大的发展,遇到许多水力学问题,由于科学水平的限制,人们主要用实验的方法或直觉来解决。

1738 年,伯诺里利用伽里略—牛顿力学和压强的概念,提出了液体运动的能量估算;1769 年,欧拉提出了液体运动的解析方法。这些成就为研究液体运动的规律奠定了理论基础。在此基础上形成一门属于数学的古典“流体力学”。

由于古典流体力学所用数学的复杂性和理想液体模型的局限,不能满意地解决工程问题,工程技术人员主要用实验方法来制定一些经验公式,以满足工程的需要。其中有些经验公式缺乏理论基础,使应用范围狭窄且缺乏进一步发展的基础,但却为后人留下不少宝贵的遗产。

从 19 世纪起,纯理论研究或单独用实验方法研究水流运动规律已不能适应高速发展的生产需要,从而走向了理论分析与实验研究相结合的道路。二者的紧密配合进一步推动了水力学的发展,形成了现代水力学。如 1883 年英国工程师雷诺(Reynolds 1842~1912)在系统实验的基础上,揭示了液体运动时的两种形态——层流和紊流,于次年他又提出了紊流运动的基本方程式——雷诺方程;1933 年尼古拉兹(Nikuradse)通过对人工粗糙管的系统实验得出了水流阻力与水头损失的关系规律。又如,意大利物理学家文丘里(G. B. Venturi 1762~1822)、法国工程师达西(H. P. G. Darcy, 1803~1858)、爱尔兰工程师曼宁(R. Manning. 1816~1897)、英国工程师弗汝德(W. Froude, 1810~1879)及德国工程师普朗特(Prandtl. 1875~1953)等都进行了大量水力学的实验研究和理论分析,从而形成了理论和实践相结合的研究道路,促进了水力学的新发展。

我国是文明古国,我们的祖先在与水的斗争中,逐步加深了对水流运动规律的认识。如相传 4000 多年以前的大禹治水,秦朝在公元前 256~210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠,这些工程说明当时对明渠水流和堰流已有一定的认识。古代的铜壶滴漏是一种计时工具,就是根据孔口出流原理使盛水容器水位发生变化来计算时间的,表明对孔口出流的规律已有相当的认识。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法,等等。但由于封建统治,使我国的科学得不到应有的发展,在水力学逐渐形成严密科学的过程中未能做出应有的贡献。中华人民共和国成立以来,水利水电事业得到突飞猛进的发展,为社会主义建设发挥了巨大的作用。无疑,随着我国水利水电建设事业的发展以及电子计算机在水利水电科学研究中的广泛应用,水力学这门学科一定会得到迅速发展。

本书根据专业的需要,探讨一些现代水力学的內容。

水力学在很多工程中有广泛的应用。在市政工程中,如城市的生活和工业用水,一般都是从水厂集中供应,水厂利用水泵把河、湖或井中的水抽上来,经过净化和消毒后,再通过管路系统把水输送到各用户。有时,为了均衡水泵负荷,还需要修建水塔。这样,就需要解决一系列水力学问题,如取水口布置、带有水泵装置的管路系统和水塔高度的计算,水泵容量和井的产水量计算,等等。在修建铁路、公路、桥梁等工程时,也必需解决一系列水力学问题。如桥涵孔径的设计,水同桥墩之间的相互作用力,站场路基排水设计,等等。

随着生产的发展,还会不断地提出新课题。学习水力学的目的,是根据有关专业的需要,获得分析和解决有关水力学问题的能力,并为进一步研究打下基础。

第二节 液体的连续介质模型

从分子结构的观点来看,物质都是由分子组成的,组成物质的分子是不连续的,彼此间有空隙。因而液体从微观结构上说,是有空隙的、不连续的物质(介质)。但是,详细研究分子的微观运动,不是水力学的任务,我们所关心的不是个别分子的微观运动,而是大量分子“集体”所显示的特性,也就是所谓的宏观特性或宏观量。因此,可以设想把所讨论的实际液体无限制地分割成为无限小的基元个体,相当于微小的分子集团,叫做液体的“质点”(或微团)。从而认为,液体就是由这样的一个紧挨着一个的连续的质点所组成的,其中再也没有任何空隙的一个连续体,即所谓“连续介质”。同时又认为液体的物理、力学特性,如密度、速度、压力和能量等,也从而具有随同位置而连续变化的性质。这样,我们就不再从那些永远运动着的分子出发,而是在宏观上从静止或运动的质点出发来研究液体的静止和运动规律。根据长期的生产和科学实验证明,利用连续介质假定所得出的有关液体运动规律的基本理论与客观实际是十分符合的。

第三节 液体的主要物理性质

力对液体的作用,都是通过液体自身的物理性质来表现的。因此,从宏观角度来探讨液

体的物理性质是研究液体运动的出发点。

在水力学中常常出现的液体主要物理性质有重度和粘性,在某些情况下还要涉及液体的压缩系数,表面张力和汽化压强等。

1. 密度和重度

液体和固体一样,也具有质量和重量,分别用密度 ρ 和重度 γ 表示。

均质液体的密度 ρ 是单位体积液体所具有的质量,即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-3-1)$$

其量纲为 $[M/L^3]$,国际单位是 kg/m^3 。工程单位是 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。

为便于掌握,以后在本书中出现的有关物理量,仅介绍其国际单位。

均质液体的重度 γ 是单位体积液体所具有的重量,即

$$\gamma = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-3-2)$$

其量纲为 $[M/L^2T^2]$,国际单位是 N/m^3 。由于它与重力加速度 g 有关,所以随位置变化。在水力学计算中一般采用 $g=9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下,其密度和重度随温度的变化,见表 1-1。几种常见流体的重度,见表 1-2。

表 1-1 水的密度和重度

温度(°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
密度(kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度(N/m^3)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

表 1-2 几种常见流体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度(N/m^3)	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
测定温度(°C)	20	0	15	15	20	15

在工程计算中,通常将水的密度和重度看做常量,取 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3=1\text{t}/\text{m}^3$,重度 $\gamma=9800\text{N}/\text{m}^3$ 。

2. 粘滞性和理想液体模型

液体是具有粘滞性的。当液体处在运动状态时,若液体质点之间存在着相对运动,则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动,这种性质称为液体的粘滞性,此内摩擦力又称为粘滞力。粘滞性是液体的基本特性之一,只有在相对运动时才显示出来,静止液体是不显示粘滞性的。

如图 1-3-1 所示,液体沿着一个固体平面壁作平行的直线流动,且液体质点是有规则的一层一层向前运动而不互相混掺(这种各液层间互不干扰的运动称为“层流运动”,以后我们将详细讨论这种运动的特性)。由于液体具有粘滞性的缘故,靠近壁面附近流速较小,远离壁

面处流速较大,因而各个不同液层的流速大小是不相同的。若距固体边界为 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(也就是存在着相对运

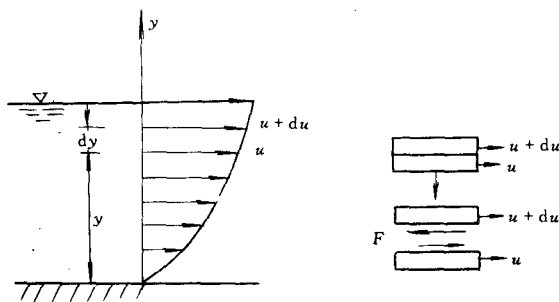


图 1-3-1

动),在两流层之间将成对地产生内摩擦力。下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力,而上面一层液体对于下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的摩擦力,这两个力大小相等,方向相反,都具有抗拒其相对运动的性质。作用在上面一层液体上的摩擦力有减缓其流动的趋势,作用在下面一层液体上的摩擦力有加速其流动的趋势。

根据前人的科学实验证明,内摩擦力 F 其大小与液体的性质有关,并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 及接触面积 ω 成正比,而与接触面上的正压力无关。则内摩擦力的函数式可表达为

$$F = \mu \omega \frac{du}{dy} \quad (1-3-3)$$

若用 τ 表示单位面积上的内摩擦力,其表达式为

$$\tau = \frac{F}{\omega} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3-4)$$

以上两式就是著名的“牛顿内摩擦定律”,它可表述为:作层流运动的液体,相邻液层间单位面积上所作用的内摩擦力(或粘滞力),与流速梯度成正比,同时与液体的性质有关。式中的 μ 是与液体的物理性质有关的比例系数,称为动力粘滞系数(或动力粘性系数)。

液体动力粘滞系数 μ 值的大小与液体性质有关。粘性大的液体 μ 值大,粘性小的液体 μ 值小。 μ 的国际单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

液体的粘性还可以用 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 来表示, ν 称为运动粘性系数,其国际单位是 m^2/s ,过去习惯上把 $1\text{cm}^2/\text{s}$ 称为 1St(斯托克斯),其换算关系为

$$1\text{St} = 0.0001\text{m}^2/\text{s}$$

水的运动粘性系数 ν 可用下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-3-5)$$

其中 t 为水温,以 $^{\circ}\text{C}$ 计, ν 以 cm^2/s 计,为了使用方便,在表 1-3 中列出不同温度时水的 ν 值。

表 1-3

不同水温时的 ν 值

温度(°C)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239	0.01176	0.01118	0.01062	0.01010
温度(°C)	22	24	26	28	30	35	40	45	50	55	60
$\nu(\text{cm}^2/\text{s})$	0.00989	0.00919	0.00877	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00515	0.00478

必须指出,牛顿内摩擦定律只适用于一般流体,对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇,等等。不符合的叫做非牛顿流体,如接近凝固的石油、泥浆,等等。它们的差别可用图 1-3-2 表示。本书不讨论非牛顿流体。

通过以后有关章节的讨论可以了解,考虑液体的粘性后,将使液体运动的分析变得很复杂。在水力学中,为了简化分析,对液体的粘性暂不考虑,而引出没有粘性的理想液体模型。在理想液体模型中,粘性系数 $\mu=0$ 。由理想液体模型分析所得的结论应用到实际液体中时,必须对没有考虑粘性而引起的偏差进行修正。

例 1-1 将一面积为 1m^2 的平板放入盛水的槽中,若平板在水面上以 $u=1\text{m/s}$ 的速度沿水平方向运动,平板和槽底之间的距离 $\delta=1\text{mm}$,假设水层内流速按直线分布,如图 1-3-3 所示。当水的温度为 10°C 时,求平板所受阻力。

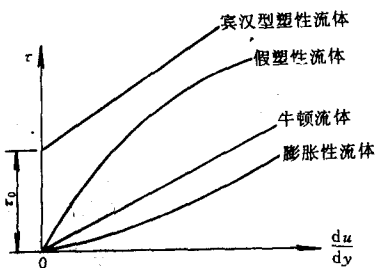


图 1-3-2

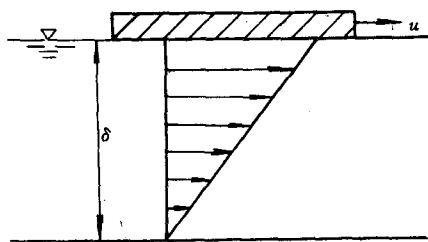


图 1-3-3

解 因水层的运动速度按直线分布,则流速梯度 $\frac{du}{dy} = \text{常数}$,查表得,当 $t=10^\circ\text{C}$ 时, $\nu=0.0131\text{cm}^2/\text{s}$, $\rho=999.73\text{kg/m}^3$,则 $\mu=1.31 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$,代入 $F=\mu\omega \frac{du}{dy}$,得

$$F = 1.31 \times 10^{-3} \times 1.0 \times \frac{1.0}{0.001} = 1.31\text{N}$$

3. 压缩性和不可压缩液体模型

压强增高时,分子间的距离减小,液体宏观体积减小,这种性质称为压缩性。温度升高,液体宏观体积增大,这种性质称为膨胀性。

液体的压缩性可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来量度。设压缩前的体积为 V ,压强增加 Δp 后,体积减小 ΔV ,体应变为 $\frac{\Delta V}{V}$,则

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-3-6)$$

由于当 Δp 为正时, ΔV 必为负值, 故上式右端加一负号, 保持 β 为正数。 β 的单位为 m^2/N 。

体积弹性系数 K 是体积压缩系数的倒数, 即

$$K = \frac{1}{\beta} = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1-3-7)$$

式中 K 的单位为 N/m^2 。

β 和 K 均表示液体的压缩性。不同种类的液体具有不同的 β 和 K 值。对于同一类液体, 它们的数值也随温度和压强而变化, 但是变化不大, 一般可看作常数。在水力学中, 一般取水的弹性系数 $K=2.1 \times 10^9 \text{Pa}$ 。此值说明, 若 Δp 为一个大气压, $\frac{\Delta V}{V}$ 约为 2 万分之一。因此, 在 Δp 不大的条件下, 水的压缩性可以忽略, 相应水的密度和重度可视为常数。只有当压强变化很大而又非常迅速时, 才考虑压缩性。如输水管路中的水击现象, 就必须考虑水的压缩性, 否则将会导致错误的结果。总之, 在可以忽略液体压缩性时, 引出“不可压缩液体模型”, 使分析简化。

例 1-2 设有 1m^3 的水, 在常温下其压强由 98kPa 增加到 9800kPa 。试求水体的压缩量为多少? 压缩后的剩余体积是多少?

解 取水的弹性系数 $K=2.1 \times 10^6 \text{kPa}$, 由式(1-3-7)可得

$$\Delta V = - \frac{V \Delta p}{K} = - \frac{1 \times (9800 - 98)}{2.1 \times 10^6} = - 0.0046 \text{m}^3$$

式中负号表示体积的缩小, 而 0.0046m^3 表示体积的压缩量。

设原体积为 V_1 , 剩余体积为 V_2 , 则有

$$V_2 = V_1 - \Delta V = 1 - 0.0046 = 0.9954 \text{m}^3$$

由上述计算可知, 当压强增加 $(9800 - 98) = 9702 \text{kPa}$ (相当于 99 个大气压) 的情况下, 水的体积仅减少 0.46%。可见, 在一般情况下, 把水看作是**不可压缩的液体, 在工程实践中是允许的。

4. 表面张力及表面张力系数

表面张力是自由液面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡, 使自由液面上液体分子受有极其微小的拉力, 这种拉力称为表面张力。表面张力仅在液体与其他介质(如气体或固体)分界面附近的液体表面产生, 液体内部并不存在, 所以它是一种局部受力现象(表面张力的大小用表面张力系数 σ 表示, 其单位为 N/m 。 σ 的大小随液体种类和温度变化而异。对于 20°C 的水, $\sigma=0.074\text{N}/\text{m}$, 对于水银 $\sigma=0.54\text{N}/\text{m}$)。由于表面张力很小, 一般说来对液体的

宏观运动不起作用, 可以忽略不计, 只有在某些特殊情况下, 才显示其影响。

在水力学实验中, 经常使用盛水或水银的细玻璃管做测压管, 由于表面张力的影响而发生毛细管现象, 如图 1-3-4 所示。

对于 20°C 的水, 玻璃管中的水面高出容

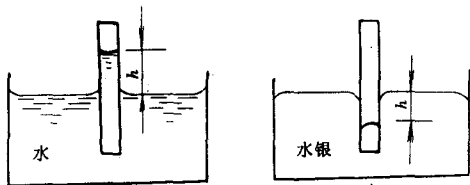


图 1-3-4

器水面的高度 h 约为

$$h = \frac{29.8}{d} \quad (\text{mm})$$

对水银,玻璃管中汞面低于容器汞面的高度 h 约为

$$h = \frac{10.15}{d} \quad (\text{mm})$$

上面二式中的 d 为玻璃管的内径,以 mm 计。由此可见,管的内径越小, h 的数值越大,因此,通常要求测压管的直径不小于 1cm。

5. 汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化,液体汽化为蒸汽。汽化的逆过程称为凝结。蒸汽凝结为液体。在液体中,汽化和凝结同时存在,当这两个过程达到动平衡时,宏观的汽化现象停止,此时液体的压强称为饱和蒸汽压强,或汽化压强。液体的汽化压强与温度有关,水的汽化压强见表 1-4

表 1-4		水的汽化压强													
水温(℃)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	
汽化压强 (kN/m ²)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33	

当水流某处的压强低于汽化压强时,水汽就要游离出来,对水流和相邻固体壁将发生不良影响,会产生气蚀现象在工程上是要时常注意的。

综上所述,从水力学观点看来,在一般情况下,所研究的液体是一种易于流动的、具有粘性、不易压缩的连续介质。在特殊情况下要考虑压缩性、表面张力及汽化压强等特性。

第四节 作用在液体上的力

处于平衡或运动状态的液体,都受有各种力的作用。作用于液体上的力,按其物理性质来看,有重力、惯性力、摩擦力和表面张力等。如果按其作用的特点,这些力可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

表面力是指作用在所研究的液体体积表面上的力。表面力的大小与受力面积成正比,故又称面积力。表面力又分两种:一种是垂直于液体体积表面上的法向力,如边壁对液体的压力、大气压对液面的作用力以及液体与液体分界面上的作用力等;另一种是平行于液体体积表面上的切向力,如摩擦力。单位面积上的表面力(压力或切力)分别称为压应力(压强)或切应力。

在国际单位制中,压应力和切应力的单位都用 N/m^2 表示,或称为 Pa。

二、质量力

作用于所研究的液体体积内所有质点上的力称为质量力。质量力的大小与质量成正比。在均质液体中,质量力又与液体体积成正比,故又称体积力。单位质量所受到的质量力称为

单位质量力。

设所研究的均质液体的质量为 M , 作用于其上的质量力为 F , 则单位质量力 f 可用下式表示, 即

$$f = \frac{F}{M} \quad (1-4-1)$$

若质量力 F 在直角坐标轴上的投影为 F_x, F_y, F_z 。单位质量力 f 在三个轴上的分量分别用 X, Y, Z 表示, 则

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{M} \\ Y &= \frac{F_y}{M} \\ Z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1-4-2)$$

在水力学中, 常见的质量力有两种类型: 一类是重力, 即地球对液体每个质点的引力, 其大小用 $G = Mg$ 表示; 另一类是惯性力, 即液体作加速运动时, 由于惯性使每个质点受到惯性力, 其大小等于质量和相应加速度的乘积。

单位质量力具有加速度的量纲。因此, 它的单位为 m/s^2 。

思 考 题

- 1-1 为什么要引出连续介质的概念? 它对研究液体的规律的意义何在?
- 1-2 什么叫液体的粘滞性? 在什么条件下才能显示粘滞性?
- 1-3 理想液体和实际液体有何区别? 为什么要引出理想液体的概念?
- 1-4 若作用在液体上的质量力只有重力, 且选择 z 坐标轴的方向垂直向上, 此时单位质量力 X, Y, Z 各为多少?

计 算 题

- 1-1 已知油的重度 $\gamma = 8.4 \times 10^3 \text{ N/m}^3$, 求油的密度。当油的运动粘滞系数 $\nu = 3.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 求油的动力粘滞系数。
- 1-2 已知 0.5 m^3 水银的质量为 6795 kg , 试求水银的重度和密度。
- 1-3 20°C 时体积为 2.5 m^3 的水, 当温度升至 80°C 时, 其体积增加多少?
- 1-4 使水的体积减小 0.1% 及 1% 时, 应增大压强各为多少?
- 1-5 水的体积为 5 m^3 , 当温度不变时, 压强从 1 个大气压增加到 5 个大气压, 其体积缩小了 0.001 m^3 , 试求水的压缩性系数 β 和弹性系数 K 。
- 1-6 试用式 (1-3-5) 求水温为 21°C 时的运动粘性系数 ν 并与用表 1-3 直线内插值比较。

第二章 水 静 力 学

水静力学是研究液体处于平衡状态的规律及其在实际中的应用。

液体的平衡状态有两种：一种是静止状态，即液体相对于地球没有运动，处于相对静止；另一种是相对平衡状态，即所研究的整个液体对于地球虽在运动，但液体对于容器或者液体质点之间没有相对运动，处于相对平衡。

绪论中曾指出，液体质点之间没有相对运动时，液体的粘滞性便不起作用，故平衡液体不呈现切应力；又由于液体几乎不能承受拉应力，所以，平衡液体质点间的相互作用是通过压应力（称静水压强）形式呈现出来。因此，水静力学的主要任务便是研究静水压强的分布规律，以及作用在平面或曲面上的静水总压力的计算方法。

第一节 静水压强及其特性

1. 静水压强的定义

在静止液体中取一微小水体作脱离体。为保持脱离体仍处于静止状态，需要在脱离体表面上施加外力，以代替四周液体对脱离体的作用，如图 2-1-1 所示。设用任一平面 $ABCD$ 将此体积分成 I、II 两部分，假定将 I 部分移去，并以与其等效的力代替它对 II 部分的作用，显然，余留部分不会失去原有平衡。

从平面 $ABCD$ 上取出一小块面积 $\Delta\omega$ ， a 点是该面的几何中心，令力 ΔP 为从移去液体方面作用在面积 $\Delta\omega$ 上的总作用力。在水力学上，力 ΔP 称为面积 $\Delta\omega$ 上的静水压力，作用在 $\Delta\omega$ 面上的平均静水压应力强度（平均静水压强） $\bar{p}$ 可用下式表示，即

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta\omega} \quad (2-1-1)$$

当 $\Delta\omega$ 无限缩小到点 a 时，平均压强 $\frac{\Delta P}{\Delta\omega}$ 便趋于某一极限值，此极限值定义为该点的静水压强，通常用符号 p 表示：

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega} = \frac{dP}{d\omega} \quad (2-1-2)$$

在国际单位制中，压力的单位为 N 或 kN，压强的单位为 N/m^2 ，又称帕斯卡，用 Pa 或 kPa 表示。

2. 静水压强的特性

静水压强具有两个重要特性。

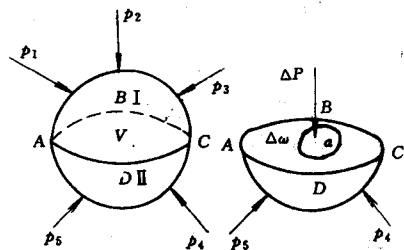


图 2-1-1