

高等学校水利类教材

水力学



李大美 杨小亭 主编



全国优秀出版社
武汉大学出版社

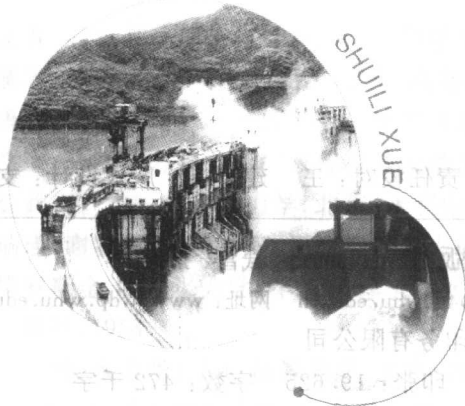
图例(910)目録編查件圖

8.400S 水利类教材
李大美 杨小亭 主编

水力学

李大美 杨小亭 主编

武汉大学出版社



本书为高等院校水利类专业教材，也可供从事水利工作的工程技术人员参考。全书共分八章，主要介绍水力学的基本概念、基本方程、明渠流、堰流、闸流、孔口流、管流、紊流、量纲分析和相似理论等。本书可作为高等院校水利类专业教材，也可供从事水利工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/李大美 杨小亭主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2004. 8
ISBN 7-307-04161-8

I. 水… II. 李… III. 水力学 IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 024370 号

责任编辑: 瞿扬清 责任校对: 王 建 版式设计: 支 笛

出版发行: **武汉大学出版社** (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 湖北省荆州市今印印务有限公司

开本: 787×1092 1/16 印张: 19.625 字数: 472 千字

版次: 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04161-8/TV·20 定价: 27.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

水力学是工程技术专业的一门重要的技术基础课,它除了要结合专业的特点和要求外,还必须兼顾水力学本身所具有的完整性和系统性,即该教材内容既要有相当广阔和系统的理论基础,还要力图结合专业知识,培养学生具有初步分析和解决有关水力学工程实际问题的能力,以及进一步开展这方面科学研究工作的能力,同时还应让学生对当前水力学研究领域的发展趋势有所了解。

在各章节内容的安排上,我们根据多年的教学经验,力图遵循学生的认识规律,贯彻理论联系实际的原则,即从具体流动现象或从工程实际问题的要求出发,在分析水力现象和运用实验方法来处理问题的基础上,进行理论的概括,然后又回来指导实践,也就是说,用水力学理论和方法解决一般或专业性质的问题。我们为编写本教材所做的努力,希望能有助于读者学习这门课程。本书由武汉大学水力学教研室李大美教授和杨小亭副教授共同编写,其中第一、三、四、五章和第九章由李大美教授编写,第二、六、七、八章和第十章由杨小亭副教授编写。另外,赵明登副教授为第六章的管网水力计算编写了计算程序(FORTRAN 语言和 C 语言)。随着计算机技术的飞速发展和先进计算工具的高度普及,我们删除了传统水力学教材中的许多计算图表(尽管它们在水力学发展中发挥过巨大作用),并用自然对数取代了传统水力学公式中的常用对数,从而避免了公式中的繁琐系数,有利于学生学习推导和记忆。本书可作为工程技术专业的本(专)科学生的教材,也可作为非工程专业的教师和研究生的参考书。

由于编者的水平所限,谬误和疏漏之处在所难免,恳切希望得到读者的多方指正。

河海大学王惠民教授为本教材担任主审,并提出了许多宝贵的意见和建议,对此,我们表示衷心的感谢。

编 者

2003 年 12 月 武汉

目 录

1 绪论	1
1.1 水力学的任务与研究对象	1
1.2 液体的主要物理力学性质	2
1.3 作用在液体上的力	7
1.4 水力学的研究方法	8
习题	9
2 水静力学	11
2.1 静水压强及其特性	11
2.2 液体平衡微分方程及其积分	13
2.3 重力作用下静水压强分布规律	16
2.4 几种质量力同时作用下的液体平衡	22
2.5 平面上的静水总压力	24
2.6 曲面上的静水总压力	28
2.7 潜体及浮体的平衡与稳定性	31
习题	34
3 水动力学基础	39
3.1 描述液体运动的两种方法	39
3.2 欧拉法的几个基本概念	41
3.3 连续性方程(Continuity Equation)	47
3.4 连续性微分方程(Differential Equation of Continuity)	48
3.5 理想液体的运动微分方程(Euler's Equation of Motion)	50
3.6 理想液体运动微分方程的伯诺利积分	52
3.7 伯诺利方程(Bernoulli's Equation)	53
3.8 理想元流伯诺利方程的物理意义与几何意义	55
3.9 实际元流的伯诺利方程	57
3.10 实际总流的伯诺利方程	58
3.11 恒定总流的动量方程	62
3.12 恒定总流的动量矩方程	66
3.13 液体微团的运动	68
3.14 有旋流动与无旋流动	71

3.15	流速势与流函数、流网	73
3.16	势流叠加原理	77
	习题	78
4	流动型态与水头损失	86
4.1	水流阻力与水头损失的两种类型	86
4.2	实际流动的两种型态	87
4.3	均匀流的沿程水头损失和基本方程式	91
4.4	圆管中的层流运动	93
4.5	液体的紊流运动	96
4.6	圆管中的紊流	100
4.7	圆管中沿程阻力系数 λ	104
4.8	边界层理论简介	112
4.9	局部水头损失	115
4.10	绕流阻力	123
	习题	125
5	孔口、管嘴出流和有压管流	128
5.1	液体经薄壁孔口的恒定出流	128
5.2	管嘴恒定出流	131
5.3	孔口(或管嘴)的变水头出流	134
5.4	短管的水力计算	135
5.5	长管的水力计算	143
5.6	管网水力计算基础	153
5.7	离心泵的工作原理	162
5.8	有压管路中的水击	167
	习题	172
6	明渠恒定均匀流	178
6.1	概述	178
6.2	明渠均匀流的基本公式	180
6.3	明渠水力计算中的几个问题	183
6.4	明渠均匀流的水力计算	187
6.5	复式断面渠道的水力计算	191
	习题	192
7	明渠恒定非均匀流	194
7.1	明渠水流的三种流态	194

7.2	断面比能与临界水深	198
7.3	水跃与水跌	204
7.4	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	211
7.5	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线分析	213
7.6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线计算	219
7.7	天然河道水面曲线计算	233
	习题	234
8	堰流和闸下出流	237
8.1	堰流及其分类	237
8.2	堰流的基本公式	238
8.3	薄壁堰	240
8.4	实用堰流	243
8.5	宽顶堰流	244
8.6	小桥孔径水力计算	247
8.7	消能池水力计算	251
8.8	闸下出流	257
	习题	259
9	渗流	261
9.1	概述	261
9.2	渗流基本定律	262
9.3	均匀渗流和非均匀渗流	265
9.4	井和集水廊道	269
9.5	渗流问题的流网解	277
9.6	电拟法	280
9.7	非线性渗流	283
	习题	285
10	模型试验基础	288
10.1	量纲、单位和无量纲数	288
10.2	量纲齐次性原理和量纲分析法	289
10.3	相似原理(Similarity Theory)	293
10.4	液流相似准则	295
10.5	模型实验	300
	习题	303

1 绪 论

1.1 水力学的任务与研究对象

水力学(Hydraulics)是介于基础课和专业课之间的一门技术基础课,属力学的一个分支。主要研究以水为主的液体平衡和机械运动规律及其实际应用。一方面根据基础科学中的普遍规律,结合水流特点,建立基本理论,同时又紧密联系工程实际,发展学科内容。

1.1.1 水力学的任务及研究对象

水力学所研究的基本规律主要包括两部分:①液体的平衡规律,研究液体处于平衡状态时,作用于液体上的各种力之间的关系,称为水静力学;②液体的运动规律,研究液体在运动状态时,作用于液体上的力与运动之间的关系,以及液体的运动特性与能量转化等,称为水动力学。水力学所研究的液体运动是指在外力作用下的宏观机械运动,而不包括微观分子运动。水力学在研究液体平衡和机械运动规律时,需应用物理学和理论力学中的有关原理,如力系平衡定理、动量定理、能量守恒与转化定理等,因为液体也同样遵循这些普遍的原理,所以物理学和理论力学知识是学习水力学课程必要的基础。

1.1.2 液体的连续介质假定

自然界的物质具有固体、液体和气体三态。固体具有一定的体积和一定的形状,表现为不易压缩和不易流动;液体具有一定的体积而无一定的形状,表现为不易压缩和易流动;气体既无一定的体积,又无一定的形状,表现为易压缩和易流动。

液体和气体都具有易流动性,故统称流体。流体分子间距较大,内聚力很小,易变形(流动),只要有极小的外力(包括自重)作用,就会发生连续变形,即流体几乎没有抵抗变形的能力。所谓液体的连续介质假定,就是认为液体是由许多微团——质点组成的(每个质点包含无穷多个液体分子),这些质点之间没有间隙,也没有微观运动,连续分布在液体所占据的空间,即认为液体是一种无间隙地充满所在空间的连续介质(Continuum)。

1.1.3 水力学的应用领域

水力学在实际工程中有广泛的应用,如农业水利、水力发电、交通运输、土木建筑、石油化工、采矿冶金、生物技术以及信息、物资、资金等流动问题,都需要水力学的基本原理。在土建工程中,如城市的生活和工业用水,一般都是由水厂集中供应的,水厂用水泵把河流、湖泊或水井中的水抽上来,经过净化处理后,再经过管路系统把水送到各用户。有时为了均衡用水负荷,还需修建水塔。仅这一供水系统,就要解决一系列水力学问题,如取水口和管路

的布置、管径和水塔高度计算、水泵容量和井的产水量计算等。

随着工农业生产的发展和城市化进程,交通运输业也在飞速发展。在修建铁路、公路、开凿航道、设计港口等工程时,也必须解决一系列水力学问题,如桥涵孔径计算、站场路基排水设计、隧洞通风排水设计等。

随着科学技术的发展,正在不断出现新的研究领域,如环境水力学、生态水力学、灾害水力学,以及人流、物流、车流、资金流和信息流等。学习水力学的目的,就是学习它的基本理论、基本方法和基本技能,以期获得分析和解决有关水力学问题的能力,为进一步的科学研究打下基础。

1.1.4 量纲和单位

在水力学研究中涉及许多物理量,这就必须了解这些物理量的量纲和单位。水力学采用国际单位制(SI)。

1) 国际单位制的单位(Unit)

包括长度:m、cm、km等;时间:s、h、d等;质量:g、kg、mg等;力:N、kN等。

2) 国际单位制的量纲(Dimension)

量纲是用来表示物理量物理性质的符号。

国际单位制的基本量纲有3个,包括长度:[L]、时间:[T]、质量:[M]。

水力学的所有物理量都能用上述3个基本量纲来表示,如体积:[V]=[L³];密度:[ρ]=[ML⁻³];重度:[γ]=[ML⁻²T⁻²]。

即任何物理量都能表示为:

$$[x] = [L^\alpha T^\beta M^\gamma] \quad (1-1)$$

根据 α 、 β 、 γ 的数值不同,可把水力学的物理量分为4类:

- 1) 无量纲量: $\alpha = \beta = \gamma = 0$
- 2) 几何学量: $\alpha \neq 0, \beta = \gamma = 0$
- 3) 运动学量: $\beta \neq 0, \gamma = 0$
- 4) 动力学量: $\gamma \neq 0$

1.2 液体的主要物理力学性质

水力学是研究液体机械运动规律的科学。本节仅讨论液体与机械运动有关的主要物理力学性质。

1.2.1 惯性、质量和密度

1) 惯性(Inertia):液体具有保持原有运动状态的物理性质;

2) 质量(Mass)(m):质量是惯性大小的量度;

3) 密度(Density)(ρ):单位体积所包含的液体质量。

若质量为 M 、体积为 V 的均质液体,其密度为:

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

对于非均匀质液体,

$$\rho = \rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (1-3)$$

密度的单位为 kg/m^3 ; 密度的量纲为 $[\rho] = [\text{ML}^{-3}]$ 。

液体的密度随温度和压力变化,但这种变化很小,所以水力学中常把水的密度视为常数,即采用一个大气压下, 4°C 纯净水的密度 ($\rho = 1\,000\text{kg}/\text{m}^3$) 作为水的密度。

1.2.2 重力和重度

1) 重力(Gravity) (G): 液体受到地球的万有引力作用,称为重力。

$$G = Mg \quad (1-4)$$

式中, g 为重力加速度。

2) 重度(Unit Weight) (γ): 单位体积液体的重力称为重度或容重。

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{Mg}{V} = \rho g \quad (1-5)$$

重度的单位为 N/m^3 ; 重度的量纲为 $[\gamma] = [\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}]$, 液体的重度也随温度变化。空气和几种常见液体的重度见表 1-1。

表 1-1 空气和几种常见液体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	11.82	133 280	6 664 ~ 7 350	7 778.3	15 600	9 996 ~ 10 084
测定温度/ $^\circ\text{C}$	20	0	15	15	20	15

在一个大气压下,纯净水的密度和重度随温度的变化见表 1-2。

表 1-2 水的密度和重度

$t/^\circ\text{C}$	0	4	10	20	30
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	999.87	1 000.00	999.73	998.23	995.67
重度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	9 798.73	9 800.00	9 797.35	9 782.65	9 757.57
$t/^\circ\text{C}$	40	50	60	80	100
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	9 723.95	9 683.09	9 635.75	9 523.94	9 392.12

在水力计算中,常取 4°C 纯净水的重度作为水的重度, $\gamma = 9\,800\text{N}/\text{m}^3$ 。

1.2.3 粘性和粘度

粘性(Viscosity): 液体抵抗剪切变形(相对运动)的物理性质。

当液体处在运动状态时,若液体质点之间(或流层之间)存在相对运动,则质点之间将

产生一种内摩擦力来抗拒这种相对运动。液体的这种物理性质称为粘性(或粘滞性)。

由于液体具有粘性,液体在流动过程中就必须克服流层间的内摩擦力做功,这就是液体运动必然要损失能量的根本原因。因此,液体的粘性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

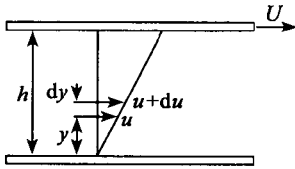


图 1-1

1686年,著名科学家牛顿(Newton)做了如下实验:他在两层很大的平行平板间夹一层很薄的液体(如图 1-1),将下层平板固定,而使上层平板运动,则夹在两层平板间的液体发生了相对运动。

实验发现,两层平板间液体的内摩擦力 F 与接触面积 A 成正比,与液体相对运动的速度梯度 U/δ 成正比。因平板间距 δ 很小,可认为液体速度呈线性分布 $U/\delta \sim du/dy$,

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

引入比例系数 μ ,可将上式写成等式

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

这就是著名的牛顿内摩擦定律。式中, μ 称为动力粘度(或动力粘性系数)(Dynamic viscosity)。 μ 值的大小与液体的种类和温度有关。粘性大的液体 μ 值高,粘性小的液体 μ 值低。

牛顿内摩擦定律也可用单位面积上的内摩擦力 τ 来表示:

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

可以证明:流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 实质上代表液体微团的剪切变形速率。

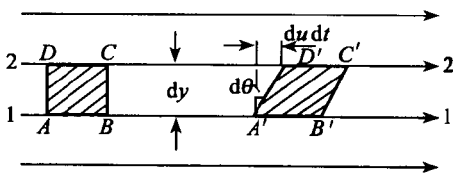


图 1-2

如图 1-2 所示,从图 1-1 中将相距为 dy 的两层液体 1-1 及 2-2 分离出来,取两液层间矩形微团 $ABCD$, 经过 dt 时段后,该液体微团运动至 $A'B'C'D'$ 。因液层 2-2 与液层 1-1 间存在流速差 du ,微团除平移运动外,还有剪切变形,即由矩形 $ABCD$ 变成平行四边形 $A'B'C'D'$ 。 AD 或 BC 都发生了角变位 $d\theta$,其角变形速率为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。因为 dt 为微分

时段, $d\theta$ 也为微量,可认为

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

故

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

因此,式(1-8)又可写成:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-9)$$

表明粘性也是液体抵抗角变形速率的能力。

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;不符合的叫做非牛顿流体,如接近凝固的石油、聚合物溶液、含有微粒杂质或纤维的液体(如泥浆)等。它们的差别可用图 1-3 表示。本教材仅讨论牛顿流体。

μ 的单位为牛·秒/米²($N \cdot s/m^2$)或帕·秒($Pa \cdot s$),或称之为“泊司”,其单位换算关系为:

$$1 \text{ 泊司} = 0.1 \text{ 牛} \cdot \text{秒}/\text{米}^2$$

动力粘度的量纲为

$$[\mu] = [ML^{-1}T^{-1}]。$$

液体的粘性还可以用 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 来表示, ν 称为运动粘性系数或运动粘度(Kinematic viscosity),其单位是米²/秒(m^2/s),过去习惯上把 1 厘米²/秒(cm^2/s)称为 1“斯托克斯”,其换算关系为:

$$1 \text{ 斯托克斯} = 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$$

运动粘度的量纲为 $[\nu] = [L^2T^{-1}]。$

水的运动粘性系数 ν 可用下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-10)$$

式中, t 为水温,以 $^{\circ}C$ 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/ $^{\circ}C$	0	2	4	6	8	10	12
$\nu/cm^2 \cdot s^{-1}$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239
温度/ $^{\circ}C$	14	16	18	20	22	24	26
$\nu/cm^2 \cdot ss^{-1}$	0.01176	0.01118	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度/ $^{\circ}C$	28	30	35	40	45	50	60
$\nu/cm^2 \cdot s^{-1}$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

任何实际液体都具有粘性,因此液体在流动过程中,就必须克服粘性阻力做功,损失能量,故粘性在水动力学研究中具有十分重要的意义。

在水力计算中,有时为了简化分析,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,必须对没有考虑粘性而引起的偏差进行修正。

1.2.4 压缩性和膨胀性

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,

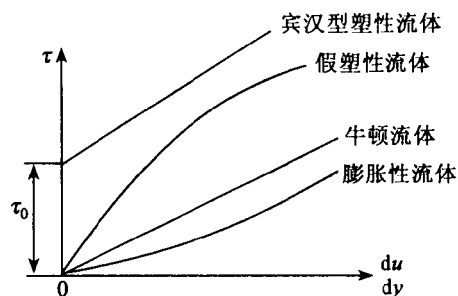


图 1-3

(Compressibility), 也称弹性(Elasticity)。温度升高, 液体宏观体积增大, 这种性质称为膨胀性(Expansibility)。

液体的压缩性大小可用体积压缩系数 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 $\frac{\Delta V}{V}$, 则体积压缩系数为:

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-11)$$

当 Δp 为正时, ΔV 必为负值, 故式(1-11)右端加一负号, 保持 β 为正数。 β 的单位为米²/牛顿(m^2/N), 量纲为 $[\beta] = [\text{M}^{-1}\text{LT}^2]$ 。

体积弹性系数 K 是体积压缩系数 β 的倒数, 即

$$K = \frac{1}{\beta} = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (1-12)$$

其单位为牛顿/米²(N/m^2), 量纲为 $[K] = [\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}]$ 。

液体种类不同, 其 β 或 K 值不同。同一液体, β 或 K 随温度和压强而变化, 但变化不大。因此, 液体并不完全符合弹性体的虎克定律。

在一般工程设计中, 水的体积弹性系数 K 可近似地取为 2×10^9 帕。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, 相应地, 水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道水击问题时, 则要考虑水的压缩性。

至于气体, 它的压缩性和膨胀性要比液体大。但是在一定的条件下, 如在距离不太长的输气系统中, 若各点气体流速远小于音速, 则气体压缩性对气体流动的影响也可以忽略, 也就是说, 这时的气体也可视为不可压缩的。

总之, 在可以忽略液体或气体压缩性时, 引出“不可压缩液(流)体模型”(Incompressible fluid model), 可使分析简化。

水力学一般不考虑水的膨胀性。

1.2.5 表面张力系数

表面张力(Surface tension)是指液体表面在分子作用半径内的一薄层分子, 由于引力大于斥力在液体表层沿表面方向产生的拉力。表面张力的大小可用表面张力系数 σ 来量度。 σ 是液体表面单位长度上所受的拉力, 单位为牛/米(N/m), 量纲为 $[\sigma] = [\text{MT}^{-2}]$ 。

σ 值随液体种类和温度而变化, 对 20°C 的水, $\sigma = 0.074$ (N/m), 对水银, $\sigma = 0.54$ (N/m)。

液体的表面张力很小, 在水力学计算中一般不考虑它的影响。但在某些情况下, 它的影响也是不可忽略的, 如微小液滴(如雨滴)的运动、水深很小的明渠水流和堰流等。

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, 由于表层液体分子与固壁分子的相互作用会发生毛细现象(Capillarity), 如图1-4所示。

对 20°C 的水, 玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为:

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

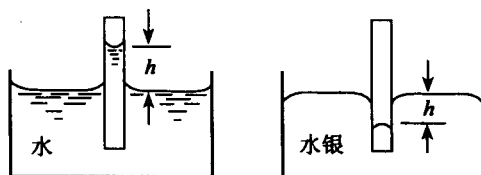


图 1-4

对水银,玻璃管中汞面低于容器汞面的高度 h 约为:

$$h = \frac{10.5}{d} (\text{mm})$$

上两式中, d 为玻璃管的内径,以 mm 计。由于毛细管现象的影响,使测压管读数产生误差。 h 称为毛细影响高度 (Capillarity suction head)。因此,通常测压管的直径不小于 1 cm。

1.2.6 汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化 (Vaporization), 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 (Saturated vapour pressure) 或汽化压强 (Vaporization pressure)。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/°C	0	5	10	15	20	25	30
汽化压强/kN·m ⁻²	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温/°C	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强/kN·m ⁻²	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, 该处会发生汽化, 形成气泡, 称为空化现象 (Cavity phenomenon)。当气泡被水流带到压力较高的地方, 就会溃灭。大量气泡的溃灭会使邻近的固壁颗粒松动、脱落, 称为气蚀 (Cavitation erosion) 现象。

综上所述, 从水力学观点来看, 在一般情况下, 所研究的液体是一种易于流动的 (静止时不能承受切应力)、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。即使施同样的力于不同的物体 (固体、液体或气体), 却可能发生不同的机械运动, 这是因为物体具有不同的物理力学特性的缘故, 因此形成了固体力学、水力学、气体力学等不同的力学独立分支。

1.3 作用在液体上的力

液体的机械运动是由外力作用引起的, 外力是液体机械运动的外因, 液体的物理力学特

性是其内因。作用在液体上的力按其物理性质分,有重力、摩擦力、惯性力、弹性力、表面张力等。但在水力学中分析液体运动时,主要是从液体中分出一封闭表面所包围的液体,作为隔离体来分析。从这一角度出发,可将作用在液体上的力分为表面力和质量力两大类。

1.3.1 表面力 (Surface force)

作用在液体表面上的力称为表面力,是相邻液体或与其他物体壁面相互作用的结果。根据连续介质的概念,表面力连续分布在隔离体表面上,因此,在分析时常采用应力的概念。与作用面正交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。其中压强 p 垂直于作用面,

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-13)$$

切应力平行于作用面,

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

顺便指出,在静止液体中,液体间没有相对运动,即 $\frac{du}{dy} = 0$, 或者在理想液体中, $\mu = 0$, 则 $\tau = 0$, 则作用在 ΔA 上的力就只有法向力 ΔP 。

在国际单位制中, ΔP 及 ΔT 的单位是牛顿(N), 简称牛, p 及 τ 的单位是牛/米² (N/m^2), 或称为帕斯卡(Pa), 简称帕, 其量纲为 $[p] = [\tau] = [ML^{-1}T^{-2}]$ 。

1.3.2 质量力 (Mass force)

质量力是指作用在隔离体内每个液体质点上的力,其大小与液体的质量成正比。最常见的是重力;此外,对于非惯性坐标系,质量力还包括惯性力。

质量力常用单位质量力来度量。若隔离体中的液体是均质的,其质量为 M , 总质量力为 F , 则单位质量力 f 为:

$$f = \frac{F}{M} \quad (1-15)$$

总质量力在坐标上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z , 则单位质量力在相应坐标的投影为 X 、 Y 、 Z 。

$$X = \frac{F_x}{M}$$

$$Y = \frac{F_y}{M}$$

$$Z = \frac{F_z}{M}$$

即

$$\vec{f} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

单位质量力具有加速度的单位: m/s^2 ; 单位质量力的量纲为 $[f] = [LT^{-2}]$ 。

1.4 水力学的研究方法

在历史的发展过程中,水力学研究液体运动不仅使用过实验方法,也使用理论分析方

法。在研究实际液体运动中,总是通过实验认识液流的特点,在此基础上运用思维能力进行理论分析,再回到实验中去检验修正,如此反复,使人们的认识逐渐深化。

1.4.1 理论分析和数值模拟

水力学对液体运动进行理论分析,首先要研究作用在液体上的力,引用连续介质模型和有关概念,运用经典力学的基本原理,如牛顿力学三大定律、动能定理、动量定理、质量守恒定律等来建立液流运动的基本方程(见第3章)。

如果引用的隔离体为微元体,基本方程为微分方程的形式,如2.2,3.3,3.5等节所讨论的欧拉微分方程等,再根据定解条件进行求解,称为理论分析方法。但由于方程的非线性和定解条件的复杂性,对于某些复杂的运动形态,采用理论分析至今仍有困难。随着计算机技术的发展,对基本方程进行数值解,已发展成一种数值模拟方法。

1.4.2 科学实验

科学实验的目的有:①在理论分析之前,通过对液体运动形态的观察,抽象出液体运动的主要影响因素,提出液体运动的简化计算模型;得到初步理论分析结果后,再通过实验来检验成果的正确性。②当理论分析还不能完全解决问题时,在实验结果的基础上提出一些经验性的规律,以满足实际应用的需要。

针对实验目的①的实验,称为系统实验。在实验室内造成某种液流运动,进行系统的实验观测,从中找出规律。

针对实验目的②的实验,又可分为原型观测和模型实验两类。原型观测是在野外或水工建筑物现场对液体运动进行观测,如水在河段或海岸中的运动、水流经水工建筑物时与水工建筑物的相互作用等,获得有关数据和资料,为检验理论分析成果或总结某些基本规律提供依据。由于现有理论分析成果的局限性,使得有些实际工程的水力学问题得不到可靠的解答。这样可在实验室内,以水力相似理论(第10章)为指导,把实际工程缩小为模型,在模型上预演相应的水流运动,得出模型水流的某些经验性的规律,然后按照水流运动的相似关系换算到原型中去,以解决工程设计的需要。这就是模型实验。

在科学实验中,为了得到液流的运动规律,必须运用理论思维,才能去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里,抓住主要矛盾。这当中除了涉及数理知识、数据处理方法外,还应强调一下“量纲分析”的重量性。量纲分析的基本原理见第10章。

习 题

1-1 水的重度 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$, 粘滞系数 $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 求其运动粘滞系数 ν 。空气的重度 $\gamma = 11.5 \text{ N/m}^3$, $\nu = 0.157 \text{ cm}^2/\text{s}$, 求其粘滞系数。

1-2 水的体积弹性系数为 $1.962 \times 10^9 \text{ Pa}$, 其体积相对压缩率为 1% 时, 求压强增量 ΔP 相当于多少个工程大气压。

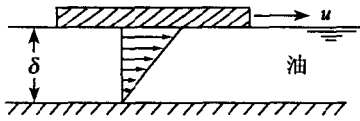
1-3 容积为 4 m^3 的水, 温度不变, 当压强增加 $4.905 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 容积减少 1000 cm^3 , 求水的体积压缩系数 β 和体积弹性系数 K 。

1-4 题 1-4 图所示平板在油面上作水平运动, 已知运动速度 $u = 1 \text{ m/s}$, 板与固定边界的距离 $\delta = 1 \text{ mm}$,

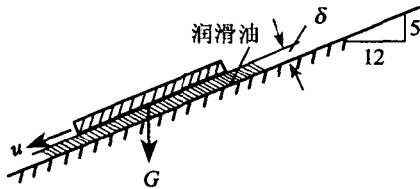
油的粘滞系数 $\mu = 1.15 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 由平板所带动的油层的运动速度呈直线分布, 求作用在平板单位面积上的粘滞阻力为多少?

1-5 一底面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 的木块, 质量为 5 kg , 沿着涂有润滑油的斜面向下等速运动, 如题 1-5 图所示。已知木块运动速度 $u = 1 \text{ m/s}$, 油层厚度 $\delta = 1 \text{ mm}$, 由木块所带动的油层的运动速度呈直线分布, 求油的粘滞系数。

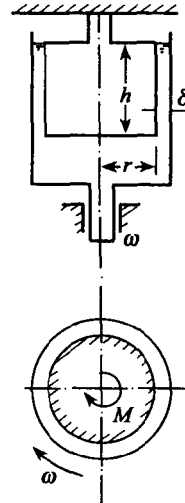
1-6 题 1-6 图所示测量液体粘滞系数的仪器。固定的内圆筒半径 $r = 20 \text{ cm}$, 高度 $h = 40 \text{ cm}$ 。外圆筒以角速度 $\omega = 10 \text{ rad/s}$ 旋转, 两筒间距 $\delta = 0.3 \text{ cm}$, 内放待测液体。此时测出内筒所受力矩 $M = 4.905 \text{ N} \cdot \text{m}$, 求油的粘滞系数 μ 。圆筒底部液体也有粘滞力, 但比圆筒侧壁所受的阻力小得多, 可以略去不计。



题 1-4 图



题 1-5 图



题 1-6 图