

工程水力学

黄文华 主编

GONG CHENG

SHUI LI XUE

广西师范大学出版社

工程水力学

主编 黄文华
编著 黄文华 黄 飏

广西师范大学出版社
• 桂林 •

图书在版编目 (CIP) 数据

工程水力学 / 黄文华主编. — 桂林: 广西师范大学出版社, 1999. 11

大学教材

ISBN 7-5633-2937-4

I. 工… II. 黄… III. 水工建筑物-水力学-高等学校-教材 IV. TV135

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 49230 号

广西师范大学出版社出版发行

(桂林市中华路 36 号 邮政编码: 541001)

(电子信箱: pressz@public.gdptt.gx.cn)

出版人: 萧启明

全国新华书店经销

广西师范大学出版社印刷厂印刷

(广西桂林市临桂县一中北侧 邮政编码: 541100)

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 19.75 字数: 510 千字

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

印数: 001 ~ 500 定价: 28.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

前 言

作者十几年来一直从事于给水排水工程专业、环境工程专业以及交土工程专业本科生水力学与工程流体力学课程教学。本书是在原水力学讲义的基础上,根据作者十几年来的教学实践,以及国内外先进经验修改补充编写而成。

本书试图建立比较严密完整的体系,并努力阐明水力学的基本规律、基本概念、基本物理现象以及处理问题的基本方法。书中基本原理、基本概念正确清晰,重点突出,文字简明,便于教学。

根据教学大纲要求,本书内容共分十章——绪论,水静力学,水运动学及动力学基础,水力摩阻与水头损失,孔口、管咀及压力管道的运动,液体在明槽中的均匀流动,液体在明槽中的非均匀流动,堰、闸出流及下流衔接,渗流,相似原理与因次分析。教材中的小字部分,可根据教学时间选择。

为了巩固和加深对教材的理解,提高学生的计算技能及独立分析、解决问题的能力,结合各章理论,配有一定数量的例题和习题,以便选用。

本书由同济大学黄文华同志(第一、六、七、八、十章)和上海城建设计院黄飏同志(第二、三、四、五、九章)共同编写,桂林市排水工程处徐梅宁同志绘图。由桂林工学院成官文副教授审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议。广西师范大学出版社宋铁莎副教授为本书的出版做了大量工作,付出了辛勤劳动。此外,在编写过程中还得到同济大学同仁的热情鼓励和大力支持,再此一并表示衷心的感谢。

限于作者的理论水平和实践经验,书中疏漏和不足在所难免,恳望同行和读者批评指正。

编 者

1997年3月20日

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 水力学的任务及实践意义	(1)
§ 1.2 连续介质模型,液体的主要物理性质	(2)
§ 1.3 作用于液体上的力	(7)
第二章 水静力学	(10)
§ 2.1 静水压强及特性	(10)
§ 2.2 液体的平衡微分方程	(13)
§ 2.3 重力作用下的液体平衡方程式	(17)
§ 2.4 运动容器中的液体平衡	(24)
§ 2.5 液体作用在壁面上的静水总压力	(26)
§ 2.6 物体在液体中的潜浮	(35)
第三章 水运动学与动力学基础	(44)
§ 3.1 运动参数和液体运动方法的研究	(44)
§ 3.2 液体运动的基本概念	(46)
§ 3.3 液体运动的连续性方程	(53)
§ 3.4 理想液体微小流束的运动微分方程式	(57)
§ 3.5 理想液体微小流束的运动微分方程式的积分(理想液体微小流束的伯诺里方程)	(59)
§ 3.6 实际液体微小流束的伯诺里方程	(64)
§ 3.7 实际液体总流的伯诺里方程	(67)
§ 3.8 气体(不可压缩的流体)的能量方程	(76)
§ 3.9 稳定总流的动量方程	(78)
§ 3.10 液体微团运动的基本形式,有旋流与无旋流	(84)
第四章 水力摩阻与水头损失	(94)
§ 4.1 水力摩阻与水头损失的类型及物理实质	(94)
§ 4.2 液体运动的两种形态	(96)
§ 4.3 均匀流基本方程	(99)
§ 4.4 圆管中的层流运动(片流运动)	(101)
§ 4.5 紊流运动的基本概念	(105)
§ 4.6 紊流运动中沿程阻力系数(λ)的分析与研究	(112)
§ 4.7 局部水头损失	(122)
第五章 孔口、管咀及压力管道中的运动	(134)
§ 5.1 液体经薄壁孔口出流	(134)
§ 5.2 液体经管咀出流	(140)
§ 5.3 变水头的孔口(管咀)出流	(143)
§ 5.4 短管中的有压管流	(146)

§ 5.5	变水头短管出流	(153)
§ 5.6	长管中的有压管流	(155)
§ 5.7	配水管网计算基础	(165)
§ 5.8	有压管道中的水击	(172)
第六章	液体在明槽中的均匀流	(184)
§ 6.1	概述	(184)
§ 6.2	明槽水力计算中的几个问题	(188)
§ 6.3	明槽均匀流水力计算的基本问题	(192)
§ 6.4	无压圆管均匀流的水力计算	(196)
第七章	液体在明槽中的非均匀流	(201)
§ 7.1	明槽非均匀流的产生及其特征	(201)
§ 7.2	明槽非均匀流的几个基本概念	(202)
§ 7.3	水跃与水跌	(209)
§ 7.4	明槽恒定非均匀渐变流水面曲线的类型	(214)
§ 7.5	棱柱形明槽中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(225)
第八章	堰、闸出流及下游衔接	(233)
§ 8.1	概述	(233)
§ 8.2	宽顶堰	(234)
§ 8.3	宽顶堰理论在小桥水力计算上的应用	(239)
§ 8.4	薄壁堰与实用剖面堰	(242)
§ 8.5	闸孔出流	(246)
§ 8.6	侧堰	(249)
§ 8.7	下游水流衔接与消能	(251)
第九章	渗流	(260)
§ 9.1	渗流模型及土壤分类	(260)
§ 9.2	渗流的理论基础	(261)
§ 9.3	地下明槽非均匀渐变渗流	(263)
§ 9.4	单井的渗流计算	(269)
§ 9.5	集水廊道水力计算	(273)
§ 9.6	井群的渗流计算	(274)
§ 9.7	渗水井与河边井	(280)
§ 9.8	流函数与流网	(285)
第十章	相似理论与因次分析	(294)
§ 10.1	水力相似原理	(294)
§ 10.2	相似准则	(295)
§ 10.3	模型实验	(300)
§ 10.4	因次分析	(303)
附图 1	梯形断面渠道底宽求解图	(309)
附图 2	梯形断面渠道均匀流水深求解图	(310)

第一章 绪论

§ 1.1 水力学的任务及实践意义

一、水力学的任务

水力学的任务是研究液体平衡和机械运动的规则及其应用的一门学科。

1. 从研究对象看,理论力学研究对象是绝对刚体,而水力学研究对象是受力后,有很大变形的流体.流体包括液体和气体.空气、蒸汽、水、汽油和润滑油等都是流体,而水力学主要是研究液体中的水。

2. 从研究运动规律来看,平衡是物体运动的一种特殊形式,水力学研究的运动规律是机械运动的规律,而机械运动是力学的范畴,所以水力学是力学的一个分支.既然水力学也是力学,所以力学中的一切概念、定义、运动方程都可应用到水力学上,则液体的力与运动关系应该服从于牛顿力学定律。

3. 从研究的侧重点看,水力学不仅有数学推导、物理概念,而且注重实际应用.这里说明一下水力学与古典水动力学的差别.古典水动力学是研究液体平衡和运动规律,是从严密的数学推理出发,追求问题的严密性和精确性,但实际液体运动的水力现象是十分复杂的,有时很难用数学方法来表达和解决.为了适应科学技术的急剧发展,促使水力学作为一门实验的学科得到发展,但水力学不如古典水动力学严格,即提出问题不如古典水动力学严密,回答问题不如古典水动力学精确.如关于压力管流中的水流速度问题,在水力学上采用过水断面上的平均流速,而古典水动力学研究过水断面上每点实际流速.随着科学技术的发展,古典水动力学的研究方法与成果已逐渐为水力学所采用,使两门学科逐渐接近成为现代的工程流体力学,即现代的工程水力学。

二、水力学的实践意义

水力学是一门技术基础课,任何一个带水的专业都离不开这门学科.除水利工程、给水排水工程、环境工程外,水利航运、水力发电、水力机械、石油化工、炼钢炼铁等都与这门学科有密切联系.如以给水排水工程为对象,研究水力学的应用.水泵从江、河、湖、井等水源,通过管道至用户使用;用过水后,要用管道排走或送至污水处理厂处理后排走.上海某自来水厂净化水的流程(图 1-1)为:水源→一级泵房→反应池→沉淀池→砂滤池→清水池→二级泵房→管网;另外一种水源→一级泵房→澄清池→滤池→清水池→二级泵房→管网.从而说明给排水工程专业中包含着一系列水力学问题。

取水口的选择:有江心取水(分层);有河岸边取水,特别在多砂河道上取水口选择不当,很容易被泥沙淤塞,这就涉及到水力学中明槽水力学的泥砂运动问题;一级泵房和二级泵房中的水泵安装,这里有一个水泵安装高程问题、计算流量及高程问题,就涉及到水力学中流态、流动阻力、水头损失这一章;管路设计问题,就涉及水力学中孔口、管咀及有压管流这一章;引水工

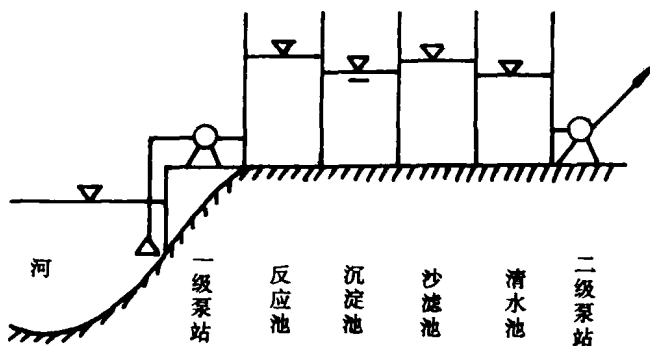


图 1-1

程中人工明槽和天然河流的问题,明槽设计中的首要问题是渠系布置和明槽形状及尺寸,以及明槽的过水能力,这就涉及水力学中明槽均匀流及明槽非均匀流这一章;水工建筑物设计中的水压力问题,就涉及水力学中的静水力学这一章;地基中的渗水,对水工建筑物底面产生一个向上的作用力,这就要学习水力学中渗流这一章;拦河闸把水位壅高,其渗流消能问题,就是水力学中堰流这一章内容。

水力学是许多工程专业的的基础,它有较广泛的实践意义.许多专业的工作人员都会在自己的劳动中与水力现象发生关系,只是研究的深度和广度有所不同而已.可见水力学是有关国民经济的一门重要学科。

§ 1·2 连续介质模型,液体的主要物理性质

一、液体的连续介质模型

从微观角度看液体是分子组成的,分子之间存在空隙,是不连续的;另外分子在空间随机运动,所以在时间上也是不连续的.根据实际情况来研究液体是一个难题,为了方便起见,把液体假设成有无数的质点(微团)组成,每个质点包含着大量分子.其质点是分子团与数学质点不同,有物理属性.质点之间没有空隙存在,所以液体成了连续分布的物质,即连续介质模型。

有了这样的模型有什么好处呢?液体视为连续介质,则液体中的一切物理量(如速度、压强、密度、切应力等),都可以视为空间坐标和时间的连续函数,可以用微积分来描述。

提出“连续介质”模型现实意义和根据:①满足实际工程的要求.近代物理研究,在标准状态下每立方厘米液体中,约有 3.3×10^{22} 个液体分子;分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8} \text{cm}$,可以想象空隙是微不足道的.生产实际中,我们研究的液体运动的空间尺度远远大于分子尺度.工程上感兴趣的是大量分子的集体行为.②工程水力学研究流体运动,只研究受外力作用下的机械运动,不研究流体内部的分子运动。

液体质点的尺度问题,利用平均物理量(如密度 $\frac{\Delta m}{\Delta x}$)与质点尺度两者关系,说明了质点的尺度应当大于分子的尺度,而又小于实际问题的尺度,即微观充分大,宏观充分小.在一般情况下,连续介质模型是合理的,只有在某些问题上,如稀薄气体流动,激波内的气体运动,薄层液体流动及水、气混合的两相流动等不能作为连续介质来处理。

二、流体的物理性质

液体受到任何一种力的作用,都要通过液体自身的性质来表现,所以在研究液体运动规律

之前,须对液体的物理性质有所了解,其主要物理性质如下:

1. 液体的流动性

液体不可能和固体一样保持一定的形状,只要在微小的切应力作用下便产生变形(流动),外力不去,变形不止,因此,静止流体不能承受切应力,这种性质称为液体的流动性. 同样,液体也不能承受拉力,而只能承受对它的压力.

2. 液体的质量—密度、重量—容量

液体具有质量,其质量是量度惯性的大小,质量愈大,惯性也愈大. 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惯性力.

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

负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反.

液体单位体积内所具有的质量称为密度,用 ρ 表示. 对于均质液体,若其体积为 V ,质量为 m ,则

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

非均质液体点密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-3)$$

液体受地球引力的影响,用重量表示. 液体单位体积内所具有的重量称为容重或重度,用 γ 表示. 对于均质液体,若其体积为 V ,重量为 G ,则

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

非均质液体的点容重为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-5)$$

单位(国际单位制(SI制)): 密度为(kg/m^3), 容重为(N/m^3). 在一般情况下,液体的密度与容重随压强和温度的变化而变化甚微,故液体的密度与容重可以视为常数. 水的密度与容重在一个标准大气压下,当不同温度时,见表(1-1)、表(1-2). 水的密度,实用上以一个标准大气压,温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 作计算值,而容重一般用 $9\,800\text{ N}/\text{m}^3$ 作计算值,则

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-6)$$

其中: g 为重力加速度,其值随纬度变化而变化甚微,在水力学上计算时,一般采用

$$g = 9.8\text{ m}/\text{s}^2$$

表 1-1 水的密度与重度

温度($^{\circ}\text{C}$)	0	5	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	9797.35	9782.65	9757.57	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

表 1-2 在标准大气压下常用液体的密度与重度

液体种类	温度(℃)	密度 ρ (kg/m ³)	重度 γ (kN/m ³)
纯 水	20	998	9.79
海 水	20	1026	10.06
20%盐水	20	1149	11.27
乙醇(酒精)	20	789	7.74
苯	20	895	8.78
四氯化碳	20	1588	15.58
氟利昂 ⁻¹²	20	1335	13.10
甘 油	20	1258	12.34
汽 油	20	678	6.65
煤 油	20	808	7.93
润滑油	20	918	9.00
水 银	20	13555	132.96

3. 液体的粘滞性

当液体处在运动状态时,若液体内部质点间或流层间存在着相对运动,则质点间或流层间一定有一种内摩擦力来抵抗其相对运动,这种性质称为液体的粘滞性,此内摩擦力称为粘滞力。

现通过以下的实验来说明。

在静止液体中放置着两块平行的平板,要求两块平板的板距 h 较小,上板受拉力 F 的作用,以匀速 v 运动,板速较小,下板固定不动,平板面积足够大,两板间液体点压强保持常数,则两板间的流速分布呈直线分布。

如图 1-2 建立坐标系,在下板上任取一点 (x, y) 。设 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$,由于相邻液层流速不同(存在着相对运动),则接触面上产生内摩擦力来阻止其相对运动。下层液体对上层液体作用了一个与流速方向相反的内摩擦力 f ,反之,上层液体对下层液体,则作用着一个与流速方向一致的内摩擦力 f ,两力大小相等、方向相反,具有抗拒其相对运动的性质。

实验证明:相邻液层接触面上的内摩擦力 f ,与接触面积 S 成正比,与两液层之间的速度差 du 成正比,与两液层之间距离 dy 成反比,同时与液体性质(即种类)有关,得

$$\tau = f \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1-7)$$

τ 与 $\frac{du}{dy}$ 的函数关系与液体种类有关。图 1-3 所示,泥浆、血浆、牙膏等为宾汉型塑性流体;尼龙、橡胶、醋酸纤维素的溶液、广告画及油画用的颜料、油漆、绝缘清漆等为假塑性流体;生面团、浓淀粉糊等为膨胀性流体。以上几种流体为非牛顿流体。对于气体和绝大多数纯净的液体,如水、汽油、煤油、甲苯、乙醇等, τ 与 $\frac{du}{dy}$ 的函数是经过原点的线性关系,这类流体通称为牛顿(Newton)流体。本书中论述的都是牛顿流体,其表达式为

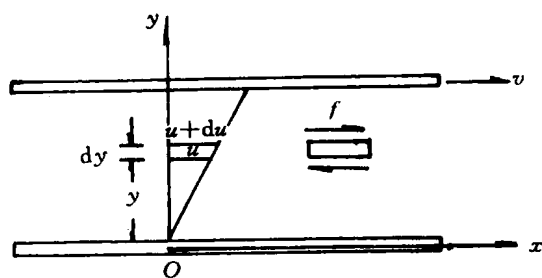


图 1-2

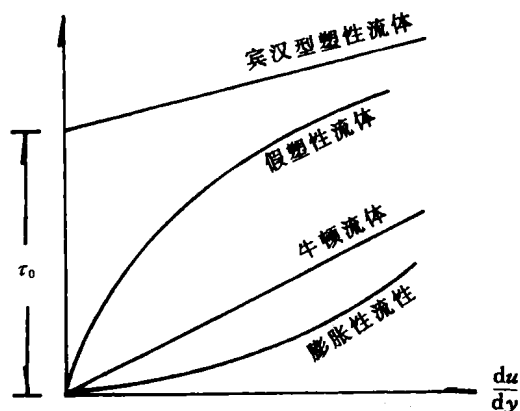


图 1-3

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

这就是牛顿内摩擦定律,其意义可以如下分析看出:

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度:表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率,单位为秒⁻¹(s^{-1}),其意义为:
在图 1-2 中,垂直于速度方向的 y 轴上,任取一边长高为 dy 的液体小方块 $ABCD$. 由于小方块下边的速度为 u ,上边的速度为 $u+du$,经过 dt 时间后,小方块 $ABCD$ 变形为 $A'B'C'D'$ (图 1-4),即两流层间的垂直连接线 AD 及 BC ,在 dt 时间中变化了角度 $d\theta$. 由于 dt 很小,因此 $d\theta$ 也很小,则

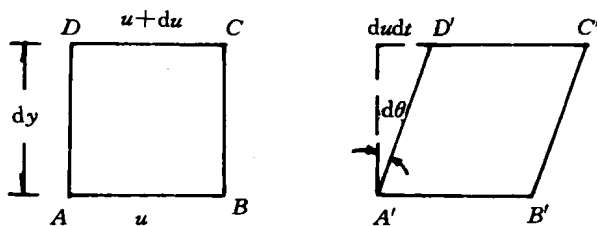


图 1-4

$$d\theta \approx \tan(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy} \quad (1-9)$$

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

即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

可见,流速梯度就是直角变形速度.这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的,所以又称剪切变形角速度.牛顿内摩擦定律也可理解为切应力与剪切变形角速度成正比.

μ ——比例系数:称为动力粘滞性系数.不同流体有不同的 μ 值,同一流体的 μ 值愈大,粘滞性愈大.由于压强增加, μ 值增大甚微,所以一般讲与压强无关;液体的 μ 值,随温度的增高而明显减小, μ 值的单位为帕·秒($Pa \cdot s$).

在水力学的运算中,经常用动力粘滞系数与液体的密度比值,表示液体粘性大小,即

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

γ 称为运动粘滞系数,单位(cm^2/s).不同温度的运动粘滞系数,可查表 1-3.

表 1-3 不同水温时的 γ 值

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

4. 液体的压缩性与膨胀性

物体在外力作用下产生变形,其去除外力后又能恢复原状,消除变形(外力不超过弹性限度时)的性质,称为弹性.由于液体只能承受压力,液体受压后体积要缩小,压力撤除后能恢复原状,这种性质称为液体的压缩性或弹性.液体压缩性的大小,以体积压缩系数 β_v 或体积弹性系数 E 来表示.

体积压缩系数是液体体积的相对缩小与压强的增值之比.若某一体积 V 的液体,在承受压强 p 的情况下增加 Δp ,因而体积缩小了 ΔV ,则体积压缩系数为

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

式中负号是考虑到压强增大,体积缩小,所以缩小体积 ΔV 与增值 Δp 始终符号相反.为了使 β_v 始终为正值,所以加一负号.体积压缩系数 β_v 值愈大,则液体压缩性亦愈大,其单位为 cm^2/N .

体积弹性系数或弹性模量 E 是体积压缩系数的倒数.

$$E = \frac{1}{\beta_v} \quad (1-13)$$

体积弹性系数愈大,液体愈不容易压缩;当体积弹性系数接近无穷大时,表示液体绝对不可压缩,单位为牛/厘米²(N/cm^2).

体积压缩系数 β 和体积弹性系数 E 随液体种类不同而不同,对同一液体随温度与压强而变化,但这种变化甚微,故一般可视为常数,例如水的 $E=2 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$,即每增加一个大气压时,水体积的相对压缩量只有两万分之一.

在压力不变情况下,当温度变化时,液体的体积也随之变化,温度升高,体积膨胀.这种特性称为液体的膨胀性,用温度膨胀系数 β_t 表示.

温度膨胀系数是指当压力保持不变,温度升高 1 K 时,单位体积液体的体积增加量,即

$$\beta_t = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta T} \quad (1-14)$$

以水为例,在标准大气压情况下,低温(273~293 K)时,每升高 1 K,体积改变万分之一点五;高温(363~373 K)时,每升高 1 K,体积改变万分之七.

由于上述原因,工程上一般都不考虑其液体的压缩性和膨胀性.只有在研究水电站高压管道中水流由于突然关闭进水阀,引起“水击”,液体的压缩性相应产生的弹性力对运动的影响就不能忽略,同时高压锅炉中水膨胀性不能忽略.

至于气体,虽然其压缩性与膨胀性较大,但当气体速度小于 50 m/s 时,其密度变化为 1%,因而温度及压强变化较小时,这种气体还像液体一样称为不可压缩的液体.

表面张力特性以及毛细管现象,在物理学中已经涉及.一般表面张力较小,在水力学问题

中,不予以考虑;但当表面为曲面,并且曲率半径很小时,表面张力的合力所引起的液体附加压强达到相当大的数值时,就必须加以考虑。

液体表面同时存在汽化过程和凝结过程,当两者达到平衡时,此时液体的压强为汽化压强。不同的温度,有不同的汽化压强,汽化压强随温度的增大而增大,水的汽化压强见表 1-4。

表 1-4 水的汽化压强

温度 $t(^{\circ}\text{C})$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强 (kN/m^3)	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

当液体某处的压强低于该温的汽化压强时,该液体某处就要发生汽化,形成汽穴现象,在水流和其接触的固壁处将产生汽蚀,应当防止。

根据上面所讲的液体的物理性质,水力学上的液体可认为是指易于流动的,不能承受拉力的,具有粘滞性的,不可压缩的连续介质。粘滞性的存在,对液体运动的分析变得较为复杂,为了对问题简化分析,在可能的条件下暂时忽略粘滞性的影响,这种没有粘滞性液体称为理想液体,相应考虑粘滞性的液体就是实际液体。由上述液体的简化,得出三个模型,即连续介质模型、不可压缩模型、理想液体模型。

§ 1.3 作用于液体上的力

处于平衡或运动状态的液体,都受有各种力作用。作用于液体上的力,按其物理性质来分,有重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等;按其作用特性来分,可分为表面力和质量力两大类。水力学中力的分类一般按其作用特性来分。

一、表面力

表面力是作用于被研究液体表面的力,其大小与作用面大小有关。在图 1-5 中液体与容器接触的表面上,图(a)是边界对液体的反作用力;图(b)是固体对液体的摩擦力;图(c)是一部分液体对相邻的另一部分液体(在接触面上)作用力都属表面力。根据作用力与作用面的方向,又可以把表面力可分为切向表面力和法向表面力。与作用面平行的表面力叫切向表面力或切应力。与作用面垂直的表面力叫法向表面力,又称压强或压应力。

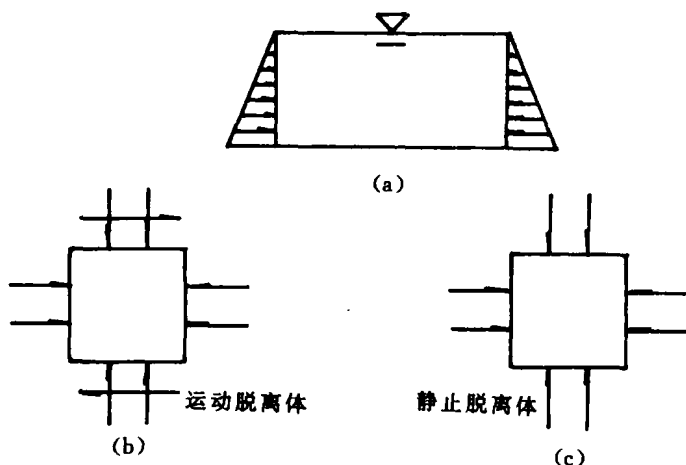


图 1-5

液体宏观上表现为连续介质,所以表面力也是连续分布.由于表面力一般分布不均匀,为了描述表面力的分布状态,采用应力的概念.设表面 ω 上取包含 A 点的微小面积 ΔS 上的法向力为 ΔP ,切向力为 ΔT ,由于它们是连续分布,可将 ΔP 与 ΔT 各除以 ΔS ,亦取极限,得到 A 点的压应力或压强 p 和切应力 τ 分别为

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dS} \quad (1-15)$$

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta S} = \frac{dT}{dS} \quad (1-16)$$

压强 p 和切应力 τ 的单位为 N/m^2 或 Pa .

二、质量力

作用于液体的每一质点上,并与受作用的液体的质量成比例的力称作质量力.在均质的液体中它和体积成比例,故又称作体积力.最常见的质量力有重力、惯性力.

量度质量力有两种:①总的质量力来度量;②单位质量力来度量.单位质量力是指作用在单位质量流体上的质量力.若有质量 m 的均质液体,作用于其上的总的质量力为 F ,则所受的单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m}$$

设 F_x, F_y, F_z 分别为质量力在 x, y, z 轴上的三个分量,则单位质量力的三个分量为

$$X = \frac{F_x}{m}, Y = \frac{F_y}{m}, Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-17)$$

单位质量力及其分量的单位是 米/秒^2 ,和加速度的单位相同.

设作用在液体上的质量力只有重力,取 xOy 平面为水面面, z 轴铅直向上,则单位质量力 $X=0, Y=0, Z=-g$.

例 1-1 如图 1-6 所示,液面上有一面积 $S=1\,200\text{ cm}^2$ 的平板 H ,以 $v=0.5\text{ m/s}$ 的速度作水平移动,形成平行板间液体的层流运动(质点沿水流直线运动),平板下液体分两层,它们的动力粘滞系数与厚度分别为 $\mu_1=0.14\text{ N}\cdot\text{s/m}^2, h_1=1.0\text{ mm}; \mu_2=0.235\text{ N}\cdot\text{s/m}^2, h_2=1.4\text{ mm}$.试绘制平板间液体的流速分布图和切应力分布图,并计算平板 H 上所受的內摩擦力 f .

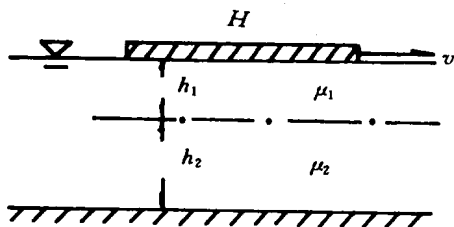


图 1-6

解 平板间为层流,其切应力服从牛顿內摩擦定律,即 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$,表面液层速度等于平板移动速度.设在液层分界面上,流速为 u ,切应力为 τ ,因 h_1, h_2 很小,近似认为流速按直线分布.

$$\text{上层液体的切应力: } \tau_1 = \mu_1 \frac{v-u}{h_1}$$

$$\text{下层液体的切应力: } \tau_2 = \mu_2 \frac{u-0}{h_2}$$

因液面平板 H 平移带动两层液体运动,使液层分界面上所产生的切应力是相等的,故

$$\tau = \tau_1 = \tau_2$$

即

$$\mu_1 \frac{v-u}{h_1} = \mu_2 \frac{u}{h_2}$$

解得

$$u = \frac{\mu_1 h_2 v}{\mu_2 h_1 + \mu_1 h_2} = \frac{0.142 \times 0.0014 \times 0.5}{0.235 \times 0.001 + 0.142 \times 0.0014} = 0.23 (\text{m/s})$$

又因为 $\tau = \tau_1 = \mu_1 \frac{v-u}{h_1} = 0.142 \times \frac{0.5-0.23}{0.001} = 38.34 (\text{N/m}^2)$

所以平板 H 所受的内摩擦力

$$f = \tau S = 38.34 \times 1200 \times 10^{-4} = 4.6 (\text{N})$$

流速分布图及切应力分布图如图 1-7.

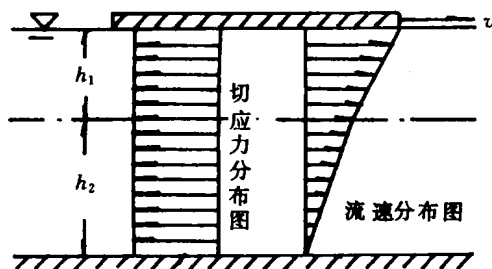


图 1-7

习 题 一

- 1-1 已知水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 求其容重. 若有这样密度的水 1 L, 它的质量和重力各为多少?
- 1-2 水的容重 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$, 动力粘滞系数 $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求它的运动粘滞系数?
- 1-3 当空气温度从 0°C 增加至 20°C 时, γ 值增加 15%, 容重 γ 减少 10%, 问此时 μ 值增加多少?
- 1-4 如图 1-8 所示, 一水平方向运动的木板速度为 1 m/s , 平板浮在油面上, $\delta = 10 \text{ mm}$, 油的 $\mu = 0.09807 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求作用于平板单位面积上的阻力.

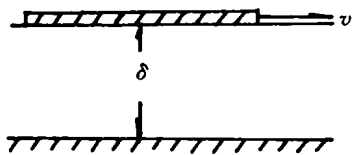


图 1-8

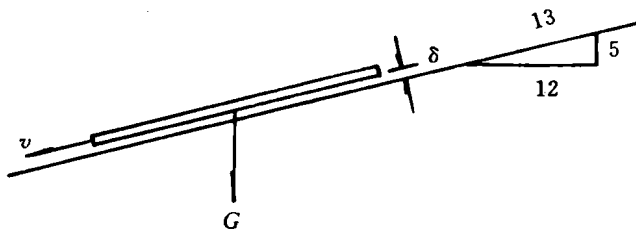


图 1-9

- 1-5 如图 1-9 所示, 一底面积为 $40 \times 45 \text{ cm}^2$, 高为 1 cm 的木块, 质量为 5 kg , 沿着涂有润滑油的斜面等速向下运动. 已知 $v = 1 \text{ m/s}$, $\delta = 1 \text{ mm}$, 求润滑油的动力粘滞系数.

- 1-6 体积为 5 m^3 的水, 在温度不变的条件下, 当压强从 1 大气压增加到 5 大气压时, 体积减小 1 L, 求水的压缩系数及水的弹性模量.

- 1-7 常用的流体力学模型有哪些?

第二章 水静力学

水静力学是研究液体处于静止状态下的平衡规律及其应用的学科。静止液体相对于参照系统而言,液体质点之间、质点与边界之间没有相对运动。在这种情况下,液体的粘滞性没有显示出来。

液体的平衡状态有两种:①静止状态,即液体相对地球没有运动的;②相对平衡状态,即所研究的整个液体质点之间、质点与容器边界之间没有相对运动,但对地球有相对运动,如图 2-1(a)所示,液体的容器作匀速直线运动,水箱为参照系,对地球有相对运动,但容器内液体处于平衡状态。这时,水箱参照系统为惯性参照系统。图 2-1(b)、(c)液体处于相对平衡状态,水箱参照系统为非惯性系统。

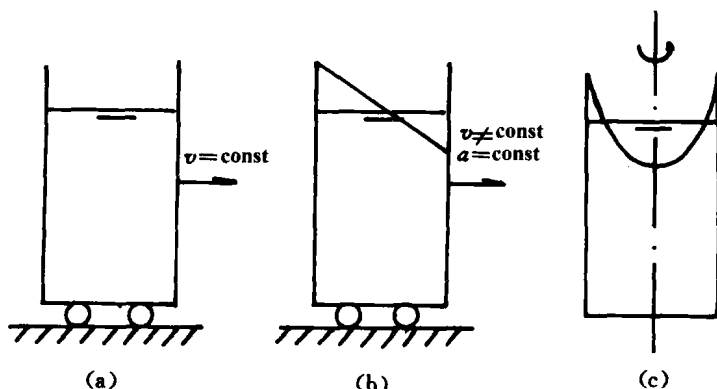


图 2-1

水静力学的核心问题是:已知质量力,求表面力的压强、分布规律及压力的大小、方向及作用点。

§ 2.1 静水压强及特征

液体对固壁以及液体对被研究液体的表面发生作用。如图 2-2 所示,设想在平衡液体中,取出具有某一体积的液体,作为自由体来研究。这部分液体是整个平衡液体中的一部分,整个液体处于平衡状态之中,这部分液体自然也是平衡的,自由体处在整个液体内部时,四周的液体对它,以及它对四周液体互相之间必然存在某种作用力。整个液体中取出来以后,如果仍然要它保持平衡状态,就必须在它的表面上加上某些力,来代替原来四周液体对它的作用力。由于液体是连续介质,因此,可以知道,这种作用力应该连续地作用在自由体表面的每个点上。在液体表面的某一个面积 S 上,也应该作用这种力,它的数值以大写 P 表示。这样一个力 P ,称之为作用在面积 S 上的液体静水压力。面积 S 为液体静水压力 P 的作用面。液体静水压力 P 与面积 S 的比值,称之为面积 S 上的平均静水压强,以 $\bar{p}$ 表示。因此,可以写成

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

当面积 S 无限缩小, 趋近于某一点 A 时, 作用在 A 点附近微小面积静水压力 ΔP 和面积 ΔS 的比值, 称之为 A 点的静水压强, 以符号小写 p 表示:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dS} \quad (2-2)$$

从上得知, 液体的静水压力和静水压强都是表面力, 只不过前者是作用在某一个面积上的总的力, 而后者是作用在单位面积或点上的力。

静水压力具有力的因次, 在工程计算中, 通常采用的单位是牛顿(N)。静水压强具有应力的因次, 通常采用牛/米²(N/m²=Pa)。

由于液体是连续的, 因此, 液体的静水压强应该是空间坐标的连续函数。

液体静水压强具有两个极为重要的特性:

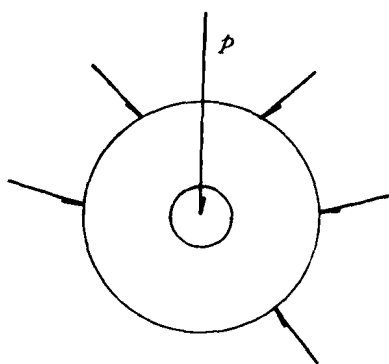


图 2-2

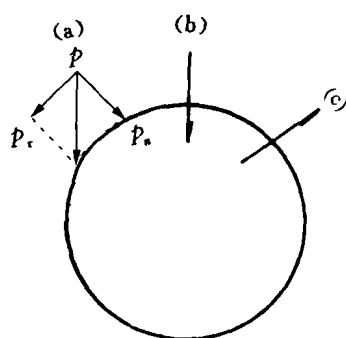


图 2-3

(1) 液体的静水压强的方向永远沿着作用面的内法线方向。

这个特征, 只能用反证法来证明。

在平衡液体中取具有某一体积的液体作为自由体, 假设作用在这部分液体表面上的静水压强方向不是垂直于作用面的, 如图 2-3 中的(a)所示。这时, 液体的静水压强可以分解为两个分量: 一个和作用面垂直的 p_n , 另一个和作用面平行的 p_t , 这与平衡液体不能承受切应力有矛盾。因此, 静水压力只能垂直于作用面。

另外假设自由体静水压强方向是外法线方向, 如图 2-3 中(c)所示, 这同液体不能承受拉力有矛盾, 所以静水压强的方向是垂直于作用面, 指向作用面, 即内法线方向。

(2) 静止液体中任意一点的静水压强的方向与作用面的方位无关, 只与该点空间位置以及液体的种类有关。

设想在平衡液体中, 在任意 O 点附近, 取边长为 dx, dy, dz , 体积为 dV 的微小四面体, 如图 2-4 所示。分析其脱离体受力情况: p_x 表示作用在 O 点的 x 方向的静水压强, p_y 表示作用在 O 点的 y 方向的静水压强, p_z 表示作用在 O 点的 z 方向的静水压强。微小四面体 $OABC$ 、 $\triangle OBC$ 、 $\triangle OBA$ 、 $\triangle OCA$ 、斜面 ABC 受到的表面力是静水压力。作用在微小表面 OBC 上的静水压力应该等于该面上的静水压强和该面 $\triangle OBC$ 的面积乘积。由于液体被认为是连续介质, 而且微小四面体又是无限小, 则可以认为作用在微小表面 $\triangle OBC$ 上各点静水压强, 都等于沿着 x 轴方向作用在 O 点的静水压强 p_x 。这样所引起误差应是高阶的。微小表面 $\triangle OBC$ 面积等于 $\frac{1}{2} dydz$ 。因此, 作用在微小表面积 $\triangle OBC$ 上的静水压力 P_x 为