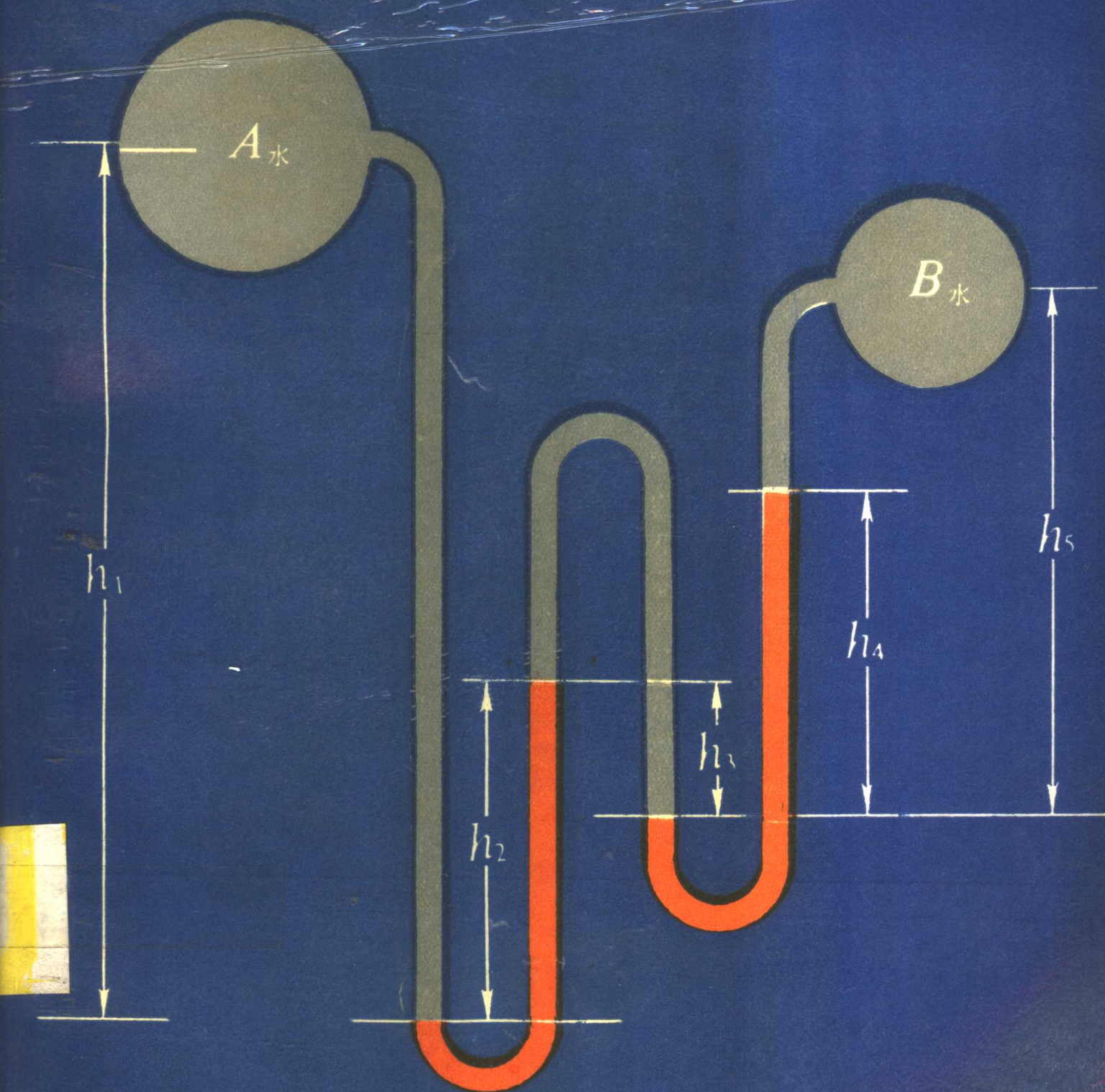


SHEILIXUE

同济大学出版社

水力学

● 吕文舫 郭雪宝 柯 葵 编



水 力 学

吕文舫
郭雪宝 编著
柯 葵

同济大学出版社

(沪)新登字 204 号

内 容 提 要

本书以同济大学编写的给水排水、道路、桥梁等专业的水力学函授讲义为基础,根据教委对非水利类专业“水力学”的基本要求改写而成。本书着重联系专业实际,突出重点,体现课程的系统性、完整性;阐述中注意概念清晰、深入浅出,循序渐进,适合学生自学。

本书各章均附有“学习指导”、“复习思考题”和“习题”。学习这些辅导材料可以帮助学生理顺概念、启迪思维,提高分析、解决问题的能力。本书适用非水利类土建专业函授学生及同类土建院校学生使用。

责任编辑 何云峰
封面设计 陈益平

水 力 学

吕文舫等编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行 常熟文化印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张 20.25 字数: 519 千字

1990 年 9 月第 1 版 1995 年 4 月第 2 次印刷

印数: 3501—6500 定价: 16.00 元

ISBN 7-5608-0653-8/TU084

前 言

本教材是在同济大学 1983 年编写的给水排水、道路、桥梁等专业用水力学函授讲义的基础上,广泛征求函授师生意见和建议后,根据国家教委 1987 年颁布的非水利类专业“水力学基本要求”进行改写的。在编写过程中注意从专业实际出发取舍内容,分清主次,突出重点,体现课程内容的完整性;注意从学生认识实际出发阐述概念,深入浅出,循序渐进,体现教学的适用性。考虑函授教学的特点,本书力求做到便于自学的要求,除了文句精确易懂,例题丰富适度外,各章后都附有“学习指导”、“复习思考题”和“习题”。“学习指导”汇总归纳各章内容的重点和要点,并对学者提出学习本章的指导性意见;“复习思考题”是围绕本章中主要的也是学生易于混淆或者出错的概念所提出的复习性思考题;而习题则是让学生在习作中理解课程的主要概念,并掌握水力计算原理和方法。编写这些辅助性教学资料的意图是,帮助学生理顺概念,启发思维,指导和帮助学生培养分析问题和解决问题的能力,达到知识结构和智能结构全面提高的目的。因此,本教材不仅可作为非水利的土建类函授专业的水力学教材,而且还可作为日校学生的教学用书。

作为函授教学重要环节的“阶段测验作业”、“面授提纲”、“水力学实验指示书”均另发。

参加本书编写工作的有:吕文舫(绪论、第一、二、三章),郭雪宝(第四、五、六、七章),柯葵(第八章)。本书的 83 年初稿经周善生、孙良佐审阅,此次修改时又经孙良佐仔细审阅,提出许多修改意见。本书的编写出版得到我校流体力学教研室、函授学院及我校出版社的帮助,在此一并致谢!

由于我们的业务水平和教学经验不足,在本书内容的选取、编排和阐述方面,难免有许多缺点和错误,恳切地希望广大读者批评指正。

编 者

一九八九年七月于同济大学

82604/07

目 录

前言

绪论

§ 0-1 水力学的任务和研究对象	(1)
§ 0-2 液体的连续介质假设	(2)
§ 0-3 液体的主要物理力学性质	(2)
§ 0-4 作用于液体上的力	(8)

第一章 水静力学

§ 1-1 静水压强及其特性	(12)
§ 1-2 重力作用下水静力学基本方程	(15)
§ 1-3 静水压强的表示、测压管水头、单位势能	(17)
§ 1-4 静水压强的量测	(22)
§ 1-5 静水压强分布图	(27)
§ 1-6 作用在平面上的静水总压力	(28)
§ 1-7 作用在曲面上的静水总压力	(35)
§ 1-8 液体平衡微分方程	(39)
§ 1-9 重力和惯性力同时作用下的液体平衡	(40)
学习指导	(47)
复习思考题	(48)
习题	(51)

第二章 水动力学基础

§ 2-1 描述液体运动的两种方法	(56)
§ 2-2 液体运动的基本概念	(58)
§ 2-3 恒定总流连续方程	(62)
§ 2-4 液体运动连续微分方程	(63)
§ 2-5 理想液体运动微分方程式——欧拉方程式	(66)
§ 2-6 恒定元流能量方程	(67)
§ 2-7 渐变流及渐变流断面压强分布规律	(71)
§ 2-8 恒定总流能量方程	(74)
§ 2-9 恒定总流能量方程应用举例	(81)
§ 2-10 恒定总流动量方程	(88)

§ 2-11 恒定总流动量方程应用举例	(91)
学习指导	(97)
复习思考题	(98)
习题	(100)

第三章 液流阻力和水头损失

§ 3-1 水头损失的工程意义及其两种形式	(105)
§ 3-2 雷诺试验——层流和紊流	(106)
§ 3-3 均匀流基本方程	(110)
§ 3-4 沿程水头损失的通用公式	(112)
§ 3-5 圆管中的层流运动	(113)
§ 3-6 液体的紊流运动	(116)
§ 3-7 沿程阻力系数的变化规律	(120)
§ 3-8 沿程水头损失的经验公式——谢才公式	(130)
§ 3-9 局部水头损失	(134)
§ 3-10 边界层理论简介	(140)
学习指导	(144)
复习思考题	(146)
习题	(148)

第四章 有压管道、孔口与管嘴出流

§ 4-1 短管的水力计算	(151)
§ 4-2 长管的水力计算	(156)
§ 4-3 液体经薄壁孔口的恒定出流	(169)
§ 4-4 液体经管嘴的恒定出流	(172)
§ 4-5 变水头下孔口、管嘴出流	(174)
§ 4-6 有压管道中的水击	(176)
学习指导	(183)
复习思考题	(187)
习题	(189)

第五章 明渠均匀流

§ 5-1 明渠均匀流的水力特征及计算公式	(197)
§ 5-2 梯形断面明渠均匀流的水力计算	(198)
§ 5-3 复式断面渠道的水力计算	(202)
§ 5-4 不满流管道的水力计算	(203)

学习指导	(206)
复习思考题	(207)
习题	(207)

第六章 明渠非均匀流

§ 6-1 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	(209)
§ 6-2 断面比能与明渠流流态	(211)
§ 6-3 临界底坡、缓坡、急坡	(216)
§ 6-4 明渠渐变流水面曲线定性分析	(218)
§ 6-5 渐变流水面曲线定量计算	(223)
§ 6-6 明渠非均匀急变流	(227)
§ 6-7 棱柱形平坡渠道上的完整水跃	(229)
§ 6-8 底坡变化渠道上水面曲线的联接	(235)
学习指导	(240)
复习思考题	(243)
习题	(245)

第七章 堰流及堰下游的水流衔接

§ 7-1 堰流的定义及其分类	(248)
§ 7-2 宽顶堰	(249)
§ 7-3 实用堰与薄壁堰	(253)
§ 7-4 小桥孔径水力计算	(254)
§ 7-5 堰下游水流衔接与消能	(259)
学习指导	(264)
复习思考题	(266)
习题	(266)

第八章 因次分析和模型试验

§ 8-1 因次分析——白金汉 π 理论	(269)
§ 8-2 相似的基本概念	(275)
§ 8-3 相似准则	(276)
§ 8-4 重力和粘性力同时作用下的相似	(281)
学习指导	(283)
复习思考题	(284)
习题	(284)

第九章 渗流

§ 9-1 概述	(287)
§ 9-2 渗流的基本定律——达西(<i>H. Darcy</i>)定律	(288)
§ 9-3 单井	(293)
§ 9-4 井群	(297)
§ 9-5 流网	(299)
学习指导	(303)
复习思考题	(304)
习题	(304)
习题答案	(305)
附录 I 不同物理量的国际单位制与工程单位制的换算关系	(309)
附录 II 梯形渠道水力计算图	(310)
附录 III 梯形渠道水力计算图	(311)
附录 IV 梯形断面明渠临界水深 h_c 求解图	(312)
附录 V 矩形、梯形断面渠道共轭水深求解图	(313)
附录 VI 矩形断面渠道收缩断面水深及水跃共轭水深求解图	(314)

绪 论

本章中心内容是阐述水力学的定义、主要任务和水力学在给水排水、道路、桥梁专业中的应用,以及液体的主要物理性质。其中液体的粘滞性是本章的重点,最后分析作用在液体上的力。

§ 0-1 水力学的任务和研究对象

水力学是研究液体的平衡和机械运动的规律及其在生产实践中应用的一门科学。它研究的主要对象是以水为代表的液体,故通常称为水力学。水力学的基本理论不仅适用水,而且也适用于各种液体和可忽略压缩性影响的气体。

水力学所研究的基本规律分为两个部分:水静力学和水动力学。水静力学指的是关于液体平衡的规律,它研究液体处于静止(或相对平衡)状态时作用于液体上的各种力之间的关系。水动力学指的是关于液体运动的规律,它研究液体在运动状态时,作用于液体上的力和运动要素之间的关系。在自然界和实际工程中,液流大多数处于运动状态,所以水力学大部分内容是讨论水动力学的问题。

水力学是许多工程实践的基础。在工农业生产的许多部门,在给水排水、水利工程、道路桥梁、石油开采、机械制造等方面,都碰到大量与液体运动规律有关的生产技术问题。例如,城市的生活和工业用水,一般都是由水厂或供水站利用水泵通过管路系统把洁净水输送给各个用户。有时为了均衡水泵的负荷还修建水塔,为此需设计水厂、打井修渠、铺设管路和选择水泵等。又如穿过公路路堤的涵洞尺寸、型式和桥梁孔径的计算等,设计这些工程必须解决一系列的水力学问题。因此,水力学是许多工科专业的一门重要的技术基础课。

图 0-1 所示为一自来水厂给水系统的示意图,其管路的布置、水管直径、水塔高度的设计、水泵容量以及井的产水量的计算等等都必须具备水力学知识。

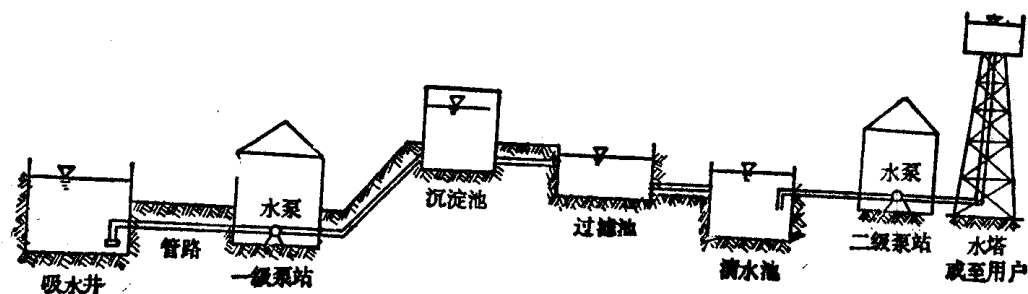


图 0-1

§ 0-2 液体的连续介质假设

液体和一切物质一样,都是由大量分子组成的。液体分子之间是有空隙的。每个分子都在不停地作不规则的热运动。但水力学并不研究液体分子的微观运动,只研究液体的宏观机械运动规律。因此在水力学中引入了液体的连续介质假设,即认为液体是由无数液体质点组成的,它没有空隙地充满所占空间。液体中各种物理量的变化也是连续的。这样可以不考虑复杂的分子运动,且液体中的一切物理量(如速度、压强、密度等)都可视为空间坐标和时间的连续函数,这样我们在研究液体运动规律时,可应用连续函数的理论来分析液体运动。

所谓液体质点指的是具有无限小的体积和质量的液体“单元”。每一液体质点包含大量的液体分子,但其尺寸大小比所研究的运动空间小得多,从而认为是液流空间中的一个点。

§ 0-3 液体的主要物理力学性质

液体与气体统称为流体。液体受到外力作用后运动状态发生变化,分析研究液体运动规律,要从液体受力情况着手,而任何一种力的作用,都与液体的物理性质密切相关,所以,在研究液体运动规律之前,需对液体的物理性质有所了解。

首先讨论液体和固体的区别。固体分子间距小,引力大,以致固体的形状不易变化,一般情况下,固体外形受外力作用而改变时,质点相互的分子引力有使固体恢复原形的倾向。

液体分子间距较大,引力较小,它的形状随容器形状而变,液体流层之间切应力与形状变化速度有关。形状变化速度愈快,切应力愈大,形状变化停止,切应力也随之消失,液体就不再恢复原形。

液体和气体的区别是气体分子间的间距较液体更大。因此,气体很容易压缩,而当外界压力移去时,它将无限制地扩张,并不具有一定的形状。液体相对地不可压缩,如果将外界压力移去(只剩下它的蒸气压力),液体会因分子内聚力的作用而聚集在一起,不会扩散。所以,液体放在容器中会有一个和气体分界的自由表面。

综上所述,液体和固体的主要区别是液体在任意切力的作用下,液体的相对静止状态将被破坏,并产生变形和流动。液体和气体的主要区别是液体能保持一定的体积,具有自由表面。液体很容易变形和变形后不再恢复原形的性质,称为流动性。正因为液体的易流性,所以液体在管、渠中易输送,这也是液体能向各个方向传递压力的原因。

下面说明液体的主要物理性质。

(一) 密度和重度

单位体积液体的质量称为液体的密度,用符号 ρ 表示。如果体积为 v 的液体,它的质量为 m , 那末

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (0-1)$$

密度的国际制(SI)单位是千克/立方米(kg/m^3);单位体积液体的重量称为液体的重度,用符号 γ 表示。如果体积为 v 的液体,它的重量为 G , 那么

$$\gamma = \frac{G}{v} \quad (0-2)$$

重度的单位是牛/米³(N/m^3)。

根据牛顿第二定律,可知 $m = G/g$, 用 v 去除左右两边,得密度和重度的关系式为

$$\rho = \gamma/g \quad \text{或} \quad \gamma = \rho g \quad (0-3)$$

式中 g 为重力加速度,其值大小和纬度有关,一般可看作常数,在本书中采用 9.8 m/s^2 。

在一般情况下,液体的密度随压强和温度的变化甚微,故液体的密度可以看作常数。例如水的密度,实用上就以在一个大气压强下,温度为 4°C 时的最大密度值作为计算值,其数值为 $1 \text{ 克}/\text{厘米}^3(\text{g}/\text{cm}^3)$ 或 $1000 \text{ 千克}/\text{米}^3(\text{kg}/\text{m}^3)$ 。不同温度下水的密度值见表 0-1。

液体的重度也随压强和温度而有所变化。但在一般情况下也可看作常数。水的重度常采用的数值为 $9800 \text{ N}/\text{m}^3$ (工程单位制的重度为 $1000 \text{ kgf}/\text{m}^3$)。不同温度下的水的重度见表 0-1。

表 0-1 不同温度下水的物理性质的数值表

温 度 t	重 度 γ (kN/m^3)	密 度 ρ (kg/m^3)	粘 滞 系 数 μ ($10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)	运动粘滞系数 U ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 K ($10^9 \text{ N}/\text{m}^2$)	表面张力系数 σ (N/m)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

现将一些常见的液体及空气，在一个工程大气压作用下 20°C 时的重度(国际单位制用千牛/立方米，工程制用公斤力/立方米表示)列入表 0-2 中，供学习使用。

例 0-1 利用表 0-2 的数据，求清水和汞的密度，用国际制表示。

解 按(0-3)式计算如下：

$$1. \rho_{\text{水}} = \frac{9.8 \text{ kN/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 1 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 1000 \text{ kg/m}^3 \left(\text{因 } 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right).$$

$$2. \rho_{\text{汞}} = \frac{133 \text{ kN/m}^3}{9.8 \text{ m/s}^2} = 13.6 \frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = 13600 \text{ kg/m}^3.$$

表 0-2 不同流体的重度值

液体名称	清水	海水	汞	四氯化碳	空气	汽油	酒精	原油	甘油	煤油
kN/m ³	9.8	10.0~10.1	133	15.6	0.0118	6.6	7.76	8.6	12.3	7.9
kgf/m ³	1000	1020~1030	13600	1600	1.206	670	790	880	1250	810

(二) 压缩性及压缩系数

液体一般不能承受拉力，但可以承受压力。液体受压后体积要缩小，这种随着所受压力的增大而液体体积减少的特性，称为液体的压缩性。液体压缩性的大小是以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 k 来表示的。

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。若某液体在承受压强为 p 的情况下(图 0-2)，其体积为 v ，当压强增加 dp 后，体积缩小 dv ，则体积压缩系数为

$$\beta = - \frac{\frac{dv}{v}}{dp}, \quad (0-4)$$

式中负号是考虑到压强增大、体积缩小，所以 dv 与 dp 始终是异号。为了保持 β 为正数，加一负号。 β 值愈大，则液体压缩性亦愈大。 β 的单位常用厘米²/牛顿(cm²/N)表示。

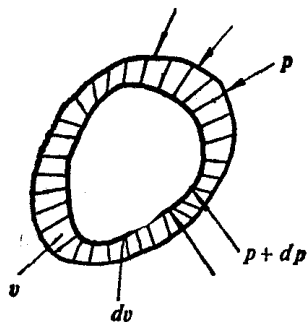


图 0-2

体积压缩系数的倒数，称为体积弹性系数 k ，即

$$k = \frac{1}{\beta}. \quad (0-5)$$

k 值越大，表示液体愈不易压缩。 $k \rightarrow \infty$ 表示绝对不可压缩。 k 常用单位为牛顿/米²(N/m²)。

液体种类不同，其 β 和 k 值不相同。同一种液体的 β 和 k 也随温度和压强而变化。由于这种变化不大，一般看作常数。不同温度下水的 k 值见表 0-1。水的体积弹性系数 $k = 2.1 \times 10^9$ 牛顿/米²(N/m²)。一般认为水是不可压缩的，但对个别情况，如讨论管路中水流的水击问题，就要考虑水的压缩性。

(三) 汽化压强

液体分子有足够的动能可以离开它的自由表面，而由液态变为气态，从而成为蒸汽或汽

化。汽化时液体具有向外扩张的压力(压强)就是汽化压强,也称饱和蒸气压。当液体所受外界压强和汽化压强相等或稍低时,液体就沸腾。汽化压强与沸点有关,汽化压强增大,沸点升高,汽化压强减小,则沸点降低。例如水在一个大气压强作用下沸点是 100°C ,当压强降到 0.024 大气压强时, 20°C 即可沸腾。一些液体在 20°C 时的汽化压强见表 0-3。

表 0-3 一些液体的汽化压强

液体名称		水	汞	四氯化碳	煤油	汽油
汽化 压强	N/m^2	2340	0.17	12100	3200	55000
	kgf/cm^2	0.024	0.0000017	0.123	0.033	0.561

从表中看出,汞的汽化压强很小,连同它重度较大的性质,常在压差计中使用。水的汽化压强也叫水汽张力,当液流某处压强低于汽化压强时,该处液流便沸腾。液流内部形成许多汽泡,这种现象称为空化。若汽泡随液流进入高压区,汽泡内的蒸气又将重新溶入液体,液流和相邻壁面将发生不良影响,会产生气蚀现象,应引起注意,不同水温的汽化压强见表 0-4。

表 0-4 不同水温的汽化压强

水温 $^{\circ}\text{C}$		0	5	10	20	30	40
汽化 压强	kN/m^2	0.61	0.87	1.23	2.34	4.24	7.38
	kgf/cm^2	0.006	0.009	0.012	0.024	0.043	0.075
水温 $^{\circ}\text{C}$		50	60	70	80	90	100
汽化 压强	kN/m^2	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33
	kgf/cm^2	0.125	0.202	0.317	0.482	0.714	1.033

(四) 粘滞性与粘滞系数

当液体处在运动状态时,除了垂直于表面的压力外,还有沿着接触面方向的切应力。当液体质点之间存在着相对运动时,则质点间会产生一种内摩擦力来抵抗其相对运动,就是说液体具有在运动状态下抵抗剪切变形的能力,这种性质称为液体的粘滞性。内摩擦力又称为粘滞力。

液体粘滞性的存在可用下面例子说明:图 0-3 所示是当液体沿某一固定平直边界流动时,位于边界法线 y 上各点的流速分布情况。图中箭头代表各点流速方向,线段长度代表点流速的大小。由于边壁和液体粘滞的相互作用,靠近壁面附近流速较小,远离壁面处流速较大,因而各不同液层的流速大小是不相同的。若距边壁为 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(也就存在着相对运动)。在其接触面上会

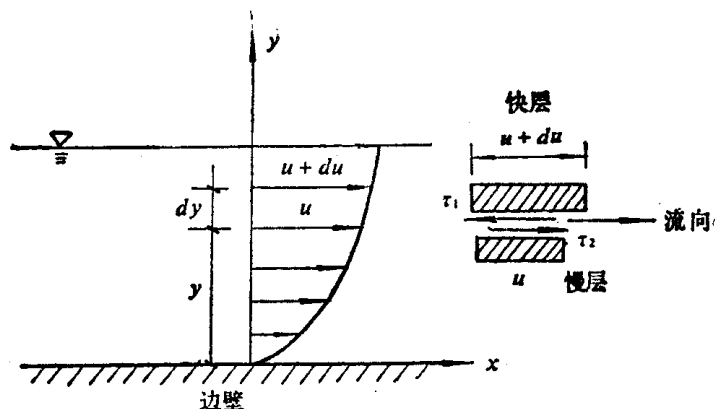


图 0-3

产生内摩擦力来阻止其相对运动。下面慢层液体对上面快层液体作用了一个与流速方向相反的单位面积上摩擦力 τ_1 ，而上面快层液体对于下面慢层液体作用了一个与流速方向一致的单位面积上摩擦力 τ_2 。这两个单位面积上摩擦力大小相等、方向相反、都具有抗拒其相对运动的性质。也即是流得快的液层对流得慢的液层起拖动作用，慢层层对快层层起阻滞作用。

科学实验证明，相邻液层接触面的单位面积上所产生的内摩擦力 τ (称粘滞切应力) 的大小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，同时与液体性质有关，其表达式为

$$\tau \sim \frac{du}{dy} \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (0-6)$$

式中 μ 为随液体种类不同而导出的比例系数，称为动力粘滞系数；两液层间流速差与其距离的比值 du/dy ，又可称为流速梯度。式(0-6)就是著名的“牛顿内摩擦定律”。

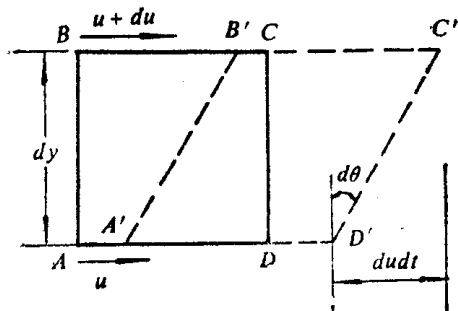


图 0-4

下面可以证明，流速梯度 du/dy 实质上是代表液体质点的剪切变形速率。在液流中的 A 点，取厚度为 dy 的方形液体质点 ABCD (图 0-4)，在流速差 du 及粘滞切应力 τ 的作用下，经过 dt 时段，其位置和形状变为 $A'B'C'D'$ ，即发生剪切变形 $d\theta$ ，因为 dt 为微分时段， $d\theta$ 也为微量，可认为

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

则单位时间内所发生的剪切变形为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (0-7)$$

因此，式(0-6)又可写成

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

这就是说, 流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 既描述了液层之间的相对运动, 又是液体的剪切变形速率, 故牛顿内摩擦定律所表明的物理实质是: 液体的粘滞切应力与液体的剪切变形速率成正比。

液体的性质对摩擦力的影响是通过粘滞系数 μ 来反映的。粘滞性大的液体 μ 值大, 粘滞性小的液体 μ 值小。在 SI 制, μ 的量纲为

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = \left[\frac{M}{L \cdot T} \right]。$$

其单位为牛顿·秒/米²(N·s/m²)或帕斯卡·秒(Pa·s)。过去的书上, 习惯用单位为达因·秒/厘米², 并常称 1 达因·秒/厘米²为 1 “泊司”。单位换算为 1 泊司 = 0.1 牛顿·秒/米²或 (0.1 N·s/m²)。

因为 μ 含有力的量纲, 故称为动力粘滞系数。在水力学的分析和计算中, 常综合考虑粘滞性和惯性(密度)来全面反映液体的物理性质, 故采用动力粘滞系数 μ 与液体密度 ρ 的比值, 用 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}。 \quad (0-9)$$

ν 的国际单位为米²/秒, 习惯上把 1 厘米²/秒(cm²/s)称为 1 “斯托克斯”。1 “斯托克斯” = 0.0001 m²/s, 因为 ν 具有运动学的量纲, 故称为运动粘滞系数。

在同一种液体中, μ 或 ν 值均随温度和压力而异, 但随压力变化甚微, 对温度变化较为敏感。液体的粘滞性则随温度的增高而减小。液体产生粘滞性的主要原因, 是分子间的内聚力(引力)所形成的粘滞性阻力。由此可知, 当温度升高时, 分子距离增大, 分子间的内聚力显著下降, 所以粘滞性减小, μ 或 ν 值变小。

对于水, 系数 ν 可按下列经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (0-10)$$

式中, t 为水温, 以 0°C 计; ν 以厘米²/秒(cm²/s)计。

为了便于计算, 表 0-1 列出了不同温度时水的 ν 值。

必须指出, 符合牛顿内摩擦定律的有水、酒精等常见的液体, 对于某些特殊液体(如泥浆、胶状液体、接近凝固的石油等)是不适用的。为了区别, 把符合牛顿内摩擦定律的液体称为“牛顿液体”, 反之称为“非牛顿液体”。

例 0-3 已知圆管中的流速分布公式为

$$u = c \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)。$$

流速分布如图 0-5 所示。试求管中粘滞切应力 τ 的分布公式。

解 题中给出流速呈抛物线分布, du/dr 为负值, 故牛顿内摩擦定律可写为

$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} = \mu \left(-\frac{2cr}{R^2} \right) = \frac{2c\mu}{R^2} r \quad (0-11)$$

式中 $\frac{2c\mu}{R^2}$ 为常数, 故 $\tau \sim r$, 切应力在管内呈三角形分布。

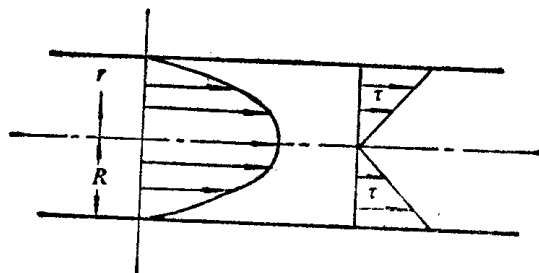


图 0-5

例 0-4 设想在长度及宽度都比较大的平板 A 、 B 之间充满油液。如图 0-6 所示，板间距离 $\delta = 1 \text{ mm}$ 。若下平板 A 固定不动，以速度 u 拉上平板 B 向右作匀速运动，则发现两平板间的各层油液也将以不同流速向右移动，且呈直线分布。与 A 平板接触的液体，因附着力流速为零，越向上流速越大，直到与 B 平板接触的液层，其流速与 B 平板相同，都等于 u 。同时发现拉动 B 平板运动的流速 u 越大，则 B 平板所受阻力越大。如 B 平板运动的流速 $u = 1 \text{ m/s}$ 。油液的动力粘滞系数 $\mu =$

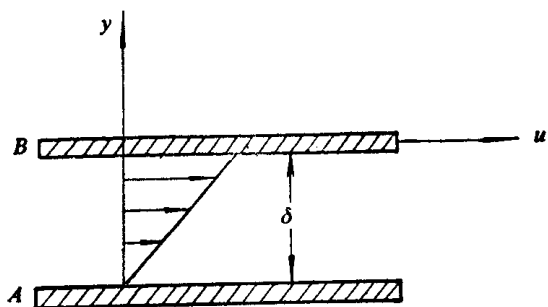


图 0-6

$0.01 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。试求作用在运动平板上粘滞切应力为多大？

解 两平板间各液层流速不同，说明各液层间将因相对运动而产生内摩擦力。在此题特殊情况下，由于板间油液运动流速呈直线分布。则流速梯度 du/dy 为常数，即各液层间的切应力相等。按牛顿内摩擦定律得

$$\tau = \mu \frac{du}{dy},$$

已知油液的动力粘滞系数 $\mu = 0.01 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，于是

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.01 \frac{1}{0.001} = 10 \text{ N}/\text{m}^2.$$

τ 的方向与平板运动速度 u 的方向相反。

实际液体都是有粘滞性的，因此在液体运动时都产生内摩擦力。考虑摩擦力进行液体运动规律的研究，是极为复杂的问题。在水力学中为了对液体运动进行简化，便于理论分析，引入了“理想液体”的概念，即忽略粘滞性或假定没有粘滞性的液体称为理想液体。

显然，理想液体运动时，是不产生内摩擦力的。如果我们首先研究这种理想液体的运动，便可以很容易得到一些理论结果，然后再考虑实际液体的粘滞性作用，对所得理论结果进行实验修正以便与实际符合。实践证明这是一种行之有效的方法，水力学就是采用这种方法。

§ 0-4 作用于液体上的力

液体作机械运动是由外力引起的。所以，在研究液体的力学规律之前，需要根据前述的概念和性质对作用于液体上的力进行分析。按力的作用方式不同，可分为质量力与表面力两类，分述如下：

(一) 质量力

这类力作用在液体的每个质点上，和质量成正比，故称质量力。如重力 $G = mg$ 就是一种质量力。当液体作加速运动时，应用达朗贝尔原理，作用在液体上的惯性力，也是一种质量力。在均质液体中，质量是和体积成正比的，故质量力又称为体积力。

质量力除用总的作用力来度量外,也常用单位质量力来度量。单位质量力是作用在单位质量液体上的质量力。如重力加速度 g 、加速度 a 。若一质量为 M 的均质液体,作用于其上的总质量力为 F ,则所受的单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{M} \quad (0-12)$$

f 的数值和量纲与重力加速度 g 或加速度 a 相同 $[L/T^2]$ 。

设总质量力 F 在空间坐标的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力 f 在相应坐标的投影为 X 、 Y 、 Z ,则有

$$\begin{aligned} X &= \frac{F_x}{M}, \\ Y &= \frac{F_y}{M}, \\ Z &= \frac{F_z}{M}. \end{aligned} \quad (0-13)$$

(二) 表面力

表面力作用于液体的表面上,其大小除用总的作用力来度量外,也常用单位面积上的表面力来度量。表面力又可分为垂直于作用面的压力(压应力)和平行于作用面的切力(切应力)。如大气对水面的压力,容器壁面对液体的反作用力等。

表面力也可以是液层分界面上的内力。如图 0-7 所示,取渠道中水流液层的分界面 ab ,在其下面部分由于靠近渠底层的水流流速慢,则相邻液层间存在相对运动而产生一对内摩擦力,它是一种内力(分界面上的压力,在图上未表示)。液层的内力在液流内部是相互平衡的,如将

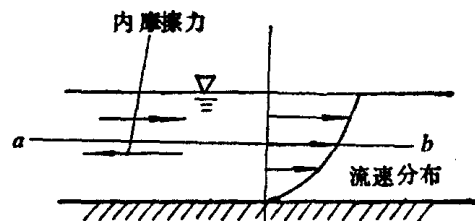


图 0-7

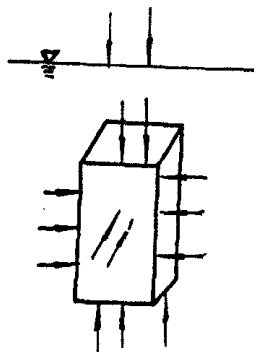


图 0-8

液流 ab 面以下部分同以上部分隔离开,则上部分对下部分隔离体的面上作用着切力,这就是表面力,而且是一种外力;又如图 0-8 所示,在静止液体中取出一块柱状液体作为隔离体,作用在柱状液体表面上的表面力(压力)也是一种外力。

学 习 指 导

本章内容包括两部分,第一部分介绍了水力学的任务以及在给排水工程和道路、桥梁工程中的实际应用情况,以明确学习本课程的目的性。由于水力学研究的对象是液体,所以第二部分着重介绍液体的主要物理性质,以便在以后各章分析液体运动时对它的内因有所认识。其次介绍了连续介质、理想液体的概念和作用在液体上的力。

本章要求对给水排水、道路、桥梁专业为什么要学习水力学,该课程学习些什么内容应有一些基本的概念。对液体的主要物理性质,不能认为这些内容在中学期间已学习过而产生