

高等学校教材

徐桂英
安毓群
张俊华

编著

工程 流体 力学

GONGCHENG
LIUXUE

黄河水利出版社

81

高等学校教材

工程流体力学

徐桂英 安毓群 张俊华 编著

黄河水利出版社

(豫)新登字 010 号

内 容 提 要

本书根据热能动力类流体力学教材编审组制定的高等学校《工程流体力学》教学大纲编写的,全书共十章。内容包括:绪论;流体静力学;流体动力学基础;流体流动阻力及能量损失;有压管中的恒定流;孔口、管嘴出流及堰流;明渠恒定流;流体物理模型实验及相似原理;气体动力学基础;挟沙水流运动基本规律。各章选有适量的例题、思考题、习题,并附有习题答案。

本书适用于该类环境保护工程、电厂应用化学工程、热工仪表测量及自动化专业和其他相近专业的流体力学课程教学使用,也可作为有关科研及工程技术人员的自学参考书。

2W45/16

工程流体力学 徐桂英 安毓群 张俊华 编著

责任编辑:郜志峰

出 版:黄河水利出版社

(地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层)

邮编:450003

印 刷:黄河水利委员会印刷厂

发 行:黄河水利出版社

开 本:787mm×1092mm 1/16

版 别:1996 年 10 月第 1 版

印 次:1996 年 10 月郑州第 1 次印刷

印 张:13.75

印 数:1—1200

字 数:318 千字

ISBN 7-80621-102-0/TV·66

定 价:20.00 元

前 言

本书是根据《工程流体力学》教学大纲并采纳了 1991 年 10 月在泰安召开的全国高等工科院校热能动力类流体力学教材编审组扩大会议的有关代表、专家们的建议编写的,属少学时流体力学教材。

本书总结了作者多年来的教学、科研、实践和经验,并吸取了有关院校流体力学教材的长处编写而成。在编写过程中考虑到电力事业迅速发展的需要,要求该类专业的大学生及工程技术人员,必须具备相当水平的流体力学基础理论知识、科学实验技术及水力计算技能。为此,本书力求达到:打好基础,精选内容,扩大知识面,实用性强的目的,并结合本类专业中的实际问题进行理论分析,适当吸收研究新成果,有利于启发学生理论联系实际思考问题,从而达到提高分析问题和解决问题的能力。

本书前四章是流体力学的基本理论部分,后六章是根据专业需要及学科发展而编排的,在授课过程中,可根据专业实际情况进行选用。

本书初稿经武汉水利电力大学及黄河水利科学研究院试用多年,期间根据教学改革和科技发展的需要,进行了多次改编。实践表明,它不仅能用于教学工作,而且还可供科技人员参考使用。

本书由徐桂英、安毓群、张俊华撰写,此次出版时并由刘忠潮教授审阅第二、三、四章,王真真教授审阅其余各章。在编写过程中,还得到水利部有关部门专家的关心和帮助,并提出许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

1996 年 1 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
§ 1-1 流体力学研究的任务	(1)
§ 1-2 流体的基本特征和连续介质的假设	(2)
§ 1-3 流体的主要物理性质	(3)
§ 1-4 作用于流体的力	(9)
第二章 流体静力学	(11)
§ 2-1 流体的静压强及其特性	(11)
§ 2-2 流体的平衡微分方程式与等压面	(13)
§ 2-3 重力作用下流体平衡的基本方程	(16)
§ 2-4 几种质量力同时作用下的流体平衡	(19)
§ 2-5 绝对压强、相对压强及真空	(21)
§ 2-6 流体静压强的测量	(25)
§ 2-7 静止液体对容器壁面总压力的计算	(30)
第三章 流体动力学基础	(45)
§ 3-1 描述流体运动的两种方法	(45)
§ 3-2 流体运动的一些基本概念	(47)
§ 3-3 一元流、二元流、三元流	(49)
§ 3-4 流体运动的连续性方程	(50)
§ 3-5 理想流体的运动微分方程	(53)
§ 3-6 理想流体及实际流体的元流能量方程	(55)
§ 3-7 实际流体总流的能量方程	(60)
§ 3-8 不可压缩气流的能量方程	(69)
§ 3-9 实际流体总流的动量方程	(70)
第四章 流体流动阻力及能量损失	(81)
§ 4-1 流动阻力和能量损失的物理概念	(81)
§ 4-2 流体运动的两种型态	(82)
§ 4-3 均匀流沿程阻力与能量损失的关系	(86)
§ 4-4 圆管的层流运动	(88)
§ 4-5 流体的紊流运动	(91)
§ 4-6 圆管紊流沿程能量损失系数的确定	(102)
§ 4-7 计算沿程能量损失的经验公式	(107)
§ 4-8 非圆形管道沿程能量损失的计算	(110)
§ 4-9 实际液流的边界层	(111)

§ 4-10 局部能量损失	(114)
§ 4-11 紊动强度的分布	(122)
第五章 有压管道中的恒定流	(128)
§ 5-1 概述	(128)
§ 5-2 简单管道的水力计算	(130)
§ 5-3 串联管道与并联管道的水力计算	(138)
§ 5-4 管道系统流量量测的水力学原理	(141)
§ 5-5 管网的水力计算	(143)
第六章 孔口、管嘴出流及堰流	(150)
§ 6-1 孔口出流	(150)
§ 6-2 管嘴出流	(154)
§ 6-3 堰流	(158)
第七章 明渠恒定流	(164)
§ 7-1 明渠均匀流的特性及基本公式	(164)
§ 7-2 水力最佳断面、允许流速	(168)
§ 7-3 明渠均匀流水力计算	(172)
§ 7-4 无压圆管均匀流的水力计算	(175)
§ 7-5 明渠恒定非均匀流概述	(178)
第八章 流体物理模型实验及相似原理	(181)
§ 8-1 模型实验概述	(181)
§ 8-2 流动相似原理	(182)
§ 8-3 流动相似准则	(183)
第九章 气体动力学基础	(187)
§ 9-1 基本概念	(187)
§ 9-2 音速	(189)
§ 9-3 微弱扰动波在气体中的传播	(190)
§ 9-4 气体一元恒定流动基本方程	(192)
§ 9-5 气流速度与通道断面的关系	(195)
§ 9-6 收缩喷管和缩放喷管	(197)
第十章 挟沙水流运动基本规律	(200)
§ 10-1 推移质运动	(200)
§ 10-2 悬移质运动	(204)
附:习题参考答案	(211)

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学研究的任务

流体力学是力学的一个分支。它是研究流体平衡和机械运动规律及其在实际工程中应用的一门科学。

流体力学所研究的基本规律分两大部分：一是关于流体平衡的规律及其应用。即研究流体处于静止(或相对平衡)状态时，作用于流体上的各种力之间的关系，这一部分称为流体静力学；二是关于流体运动的规律及其应用。它研究流体处于运动状态时，作用于流体上的力与运动要素之间的关系，以及流体运动特性与能量转换等，这一部分称为流体动力学。

流体力学在研究流体平衡和机械运动时，要应用物理学、理论力学中有关物体平衡和运动的原理。如力系平衡定理、动能定理、动量定理等等。因为流体在静止或运动状态下，同样也遵循这些普遍原理，所以物理学、理论力学以及数学都是学习流体力学必要的基础课程。

流体包括液体和气体。本教材主要研究以水为代表的液体运动规律，但所得基本规律完全适用于其他液体和可以忽略压缩性的气体。在第九章里，将专门研究气体动力学的基本理论基础。

流体力学是一门重要的技术基础课，它研究流体运动的基本规律。流体运动比固体运动要复杂得多，因为流体的运动是在一定边界条件下流动，而流动的边界又是千变万化的。例如，有的在管道中流动，有的在明渠内流动，……这种种的流动问题，没有固定的解决方法，所以，当我们研究流体运动规律时，对于较复杂的流动常采用理论分析与试验相结合的方法。首先要建立一些基本概念，再用力学中的基本原理、定理建立方程，然后通过实验来验证方程的准确性，并加以修正，最后提出具体的计算方法。因此，在学习过程中，要特别注意正确理解和掌握：①流体力学所建立的基本概念；②所用的基本理论；③基本的计算方法和实验技术；④理论联系实际分析问题的方法。

流体力学在国民经济的许多部门都具有广泛的应用。如水利工程、城市建设、环境保护、航运、化工、热工测量、电力等等，都要用到流体力学的基础理论知识。就火电厂来说，在生产过程中，都是以流体作为工作介质的，电厂内，输送流体的管道纵横排列与各种设备连接，完成流体输送的任务。要保证电厂正常生产，必须对各种热力设备和管道系统中流动的工作介质的温度、压力、流速和流量等参数进行严密的监测，并对这些参数及时准确地进行自动控制和调节。另一方面，电厂排出的污水、废气，要排除或综合利用，就需要修建废水处理工程、废气控制工程等。因此，对于电厂工作人员来说，学习和掌握流体静止和运动基本规律的知识是非常必要的，可根据工作需要，对本教材内容选择学习。

§ 1-2 流体的基本特征与连续介质的假设

一、流体的基本特征

液体的性状介于气体与固体之间。一方面,液体像固体一样能保持一定体积,很不容易被压缩;但另一方面,液体又与气体一样都没有固体那种保持自身形状的能力,具有易流动性。这是液体与气体区别于固体的基本特征。依据液体与气体都具有易流动性这一宏观表象,故将二者统称为流体。

从力学角度来看,流体与固体的区别,在于它们所能承受的应力状态不同。流体几乎不能承受拉应力,只能抵抗压应力,而在微小的切应力作用下,流体便很容易不断发生变形或流动,说明流体不能在切应力作用下维持平衡,或者说只要有切应力存在(不管多么微小),流体就不会静止下来。固体却不同,它不仅能承受一定的拉应力和压应力,即使在一定限度的切应力的作用下,它也能产生相应的弹性变形而保持平衡。显然,流体不能在切应力作用下维持平衡的性质,与固体有着根本的区别。

液体与气体虽同属于流体,但其性态也不完全相同。液体很不容易被压缩,当容器的体积大于它的体积的时候,它不能充满容器,而会形成自由液面;气体很容易被压缩,没有固定的体积,能够充满任何容器,不存在自由表面。

二、连续介质的假设

从微观的角度看,流体的结构是由流体分子所组成,且分子与分子之间具有间隙,流体是不连续的;但是在流体力学中,我们是从宏观的角度来研究流体的机械运动,不研究流体微观的分子运动。因此,常将流体视为连续介质,即把流体看作由完全充满所占空间的、内部无任何空隙的无数流体质点所组成的连续体。所谓流体质点(或流体微团)是指它的大小相对于流动空间或流体中的固体而言是微不足道的,可以当做一个点来看待,但比起分子尺度来说还是大的,能包含足够多的分子数,使之可用统计平均的方法研究流体的物理性质。

流体既被看作是连续介质,这样就可利用连续函数来分析研究流体的平衡和运动规律,因为数学分析方法是建立在连续函数的基础上的。正因为这样,连续介质是流体力学中一个带根本性的假设。

连续介质的假设,是1753年由欧拉首先提出来的,在流体力学中被广泛应用,实践证明这是十分合理的。这是因为分子空隙间的距离与我们研究的流体尺度比较起来是微乎其微的,故连续介质的假说,并不妨碍我们分析问题的正确性。当然,连续介质的假设也有一定的应用范围,当研究的区域很小,与分子大小处于同一数量级时,或者在很稀薄的气体中,连续介质的假设就不再适用,而必须考虑为不连续体。另外,当液体性质有局部突变时连续介质的假设也不合适,例如液流中发生汽化形成汽穴时,就会破坏流体的连续性。

§ 1-3 流体的主要物理性质

物体作机械运动都是受外力作用的结果。分析研究流体运动的规律,要从分析流体的受力情况着手,而任何一种力的作用,都要通过流体自身的性质(内因)来表现,所以在研究流体运动规律之前,须对流体的物理力学特性有所了解。

一、流体的密度与重度

流体的质量通常用密度来表示。流体的密度是单位体积中所含的质量。对均质流体,设质量为 M , 体积为 V , 则其密度为

$$\rho = M/V \quad (1-1)$$

对于非均质流体,各点密度不同。在流体中某点取包含该点的微小体积 ΔV , 该体积内流体的质量为 Δm , 则该点的流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

单位体积流体所具有的重量称为重度,也称容重或重率,以 γ 表示。对均质流体,若其体积为 V , 重量为 G , 则重度为

$$\gamma = G/V \quad (1-3)$$

对非均质流体,各点重度不同,某点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-4)$$

式中: ΔV 为包含某点的微小体积; ΔG 为该体积内的流体重量。

在重力场中,流体的密度和重度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

在国际单位制中,密度的单位为 kg/m^3 ; 重度的单位为 N/m^3 。

密度 ρ 与地理位置无关。但由于重力加速度 g 随地球的纬度、海拔高度而变化,故流体的重度随地理位置的变化而变化。

二、流体的压缩性与膨胀性

在一定的温度下,作用在流体上的压力增加时,流体所占有的体积将缩小,这种性质称为流体的压缩性。当压力一定温度增高时,流体的体积将膨胀,这种特性称为流体的膨胀性。这表明,一定质量的流体,其密度随压力和温度不同而发生变化。由于气体分子之间的引力要比液体小得多,因此在这两种物理性质上气体和液体的差别很大,必须分别进行讨论。

(一)液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性通常用体积压缩系数 β_v 来表示。 β_v 表示一定温度下,压力每增加一个单位时,液体体积相对减少的数值,即

$$\beta_v = - \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-6)$$

式中: V 为液体原有体积; dV 为体积改变量; dp 为压力的增加量。式中加一负号的原因是: 压强增加(即 dp 为正号), 体积被压缩(即 dV 为负号), 两者符号相反, 要使 β_v 以正数表示, 式(1-6)前必须加一负号。式(1-6)表明: β_v 愈大愈易压缩。 β_v 的单位是: m^2/N ; β_v 的倒数称为弹性系数或弹性模数, 以 E 表示。

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

E 的单位是 N/m^2 。

液体的压缩系数很小, 或者说它的弹性系数很大, 因此, 在实际工程中, 就认为液体是不可压缩的流体。只有在压强变化急骤的特殊场合下(如水击现象等), 才考虑液体的压缩性。

液体的膨胀性通常用体积膨胀系数 β_t 来表示。 β_t 是指压力不变, 温度每升高 1 个单位所引起液体体积的增量, 即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-8)$$

式中: dt 为液体温度的增量, $^\circ\text{C}$; V 为液体原有体积; dV 为液体体积的增加量; β_t 的单位: $1/^\circ\text{C}$ 。

液体的膨胀性是很小的, 在工程计算中, 一般不予考虑。

(二) 气体的压缩性与膨胀性

气体与液体不同, 当压力和温度改变时, 其密度变化比较大。气体的压缩性与膨胀性, 通常用理想气体的状态方程来表示。即

$$p = R \rho T \quad (1-9)$$

式中: p 为绝对压力, N/m^2 ; T 为绝对温度, K ; ρ 为气体的密度, kg/m^3 ; R 是气体常数, 可由标准状态下的参数来确定。例如空气, 把标准状态下的 $p_0 = 101300 \text{ N}/\text{m}^2$, 比容(单位质量气体所占的体积) $U_0 = 0.773 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T_0 = 273 \text{ K}$ 代入(1-9)式得 $R = 287 [\text{N} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

对于实际气体, 在通常温度下, 当压力的变化不大时, 应用式(1-9)计算气体密度可以得到满意的结果。

(三) 不可压缩流体的假设^[1]

由以上所述可知, 压力和温度的变化都会引起流体密度的变化。任何流体, 不论是气体或是液体, 都是可以压缩的。但因为液体的压缩性很小, 所以在实际计算中通常把液体视为不可压缩流体, 而气体的压缩性比液体大, 视为可压缩性流体。但这都不是绝对的, 在实际工程中要视具体情况而定。例如, 研究管道中水击和水下爆炸时, 水的压力变化较大, 而且变化非常迅速, 这时水的密度变化就不可忽略, 应把水视为可压缩流体来处理。又如, 当气流速度低于 70 m/s 时, 在压力和温度变化不大时, 气体的密度变化也很小, 这时即可把气体视为不可压缩流体, 其误差不超过 1%。例如在锅炉尾部烟道和通风管道中, 气体在整个流动过程中, 就可作为不可压缩流体处理。水在标准大气压下不同温度时的密度和重度见表 1-1。

表 1-1

标准大气压下,不同温度时纯水的密度和重度

$t(^{\circ}\text{C})$	0	4	10	20	40	60	80	100
$\gamma(\text{N/m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.55	9782.95	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77
$\rho(\text{kg/m}^3)$	999.87	1000	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65

〔例题 1-1〕 在容器中压缩某一种液体。当压力为 10^6 N/m^2 时,液体的体积为 1 m^3 ; 当压力增加到 $2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 时,其体积为 0.995 m^3 。问该种液体的压缩系数 β , 为多少?

解:由式(1-8)得

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} = -\frac{1}{1.0} \frac{(0.995 - 1.0)}{(2 \times 10^6 - 1 \times 10^6)} = 5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$$

三、流体的粘滞性

流动着的液体有阻抗剪切变形,在流层间产生内摩擦力的特性,这就是粘滞性(或粘性)。为了弄清粘滞性的含义和作用,下面举例说明。图 1-1 为液体在宽浅水槽中部的流动情况。沿深度 y 方向,我们实测出各点的流速,并绘成图 1-1。

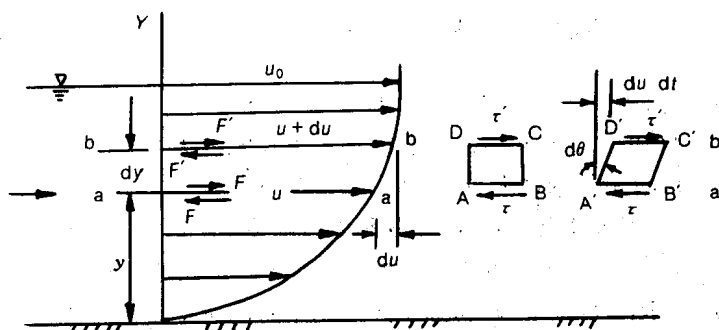


图 1-1

从流速分布曲线可看出,在液面流速大,靠底部流速小。其成因是:与槽底相接触的液层中的质点由于附着力的作用,将贴附在槽底上静止不动。同时,槽底以上各流层中质点的运动,因受粘滞性的作用,并非各不相干,而是互相牵连运动的。所以,槽底以上各流层中质点的速度都不同程度地受到不动质点的阻滞影响而减慢,离槽底愈远,不动质点的影响愈小,该处质点流速减慢的程度也应小些,这就形成图 1-1 上液面流速大,近底流速小的连续曲线。这一连续的流速分布曲线上各点相对运动的大小可用流速梯度 du/dy 表示,流层间的相对运动一经形成,就会出现快的质点带动慢的质点,慢的质点阻滞快的质点的现象,从而在相邻流层分界面(接触面)产生成对的切向力,称为内摩擦力(粘性切力),如图 1-1 上 $a-a$ 及 $b-b$ 等分界面上的 F 及 F' 。内摩擦力具有双重意义:一方面它作用于质点 $ABCD$ 上,使其发生剪切变形;另一方面,从该质点的角度来看,它又是企图阻抗剪切变形的力。综上分析,液体粘滞性,是液流质点发生相对运动,产生内摩擦力,引起质点变形,形成液流阻力的重要因素;它直接影响着液流的流动状态,同时也是液流机械能损失的根源,因为液流克服粘性阻力做功必然要消耗机械能。

内摩擦力怎样确定呢?早在 1686 年牛顿^[2](Newton)提出的液体内摩擦定律就已初

步解决了这一问题。这个定律指出：当液体内部各层间发生相对运动时，这两相邻流层间的内摩擦力 F 的大小与液体的粘滞性、流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 及接触面积成正比，而与接触面上的压力无关（试与固体的摩擦力比较）。若用比例系数 μ 表征液体粘滞性的大小， A 表示相邻液层接触面积，则

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

或

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中： τ 为单位面积上的内摩擦力即粘性切应力。如图 1-1 所示，运动较快的流层作用于运动较慢的流层上的切力，其方向与运动方向相同。反之，运动较慢的流层作用于较快的流层上的切力与运动方向相反。二者成对出现，大小相等，方向相反。切应力的单位为： N/m^2 ，即帕斯卡，简称帕（Pa）。 μ 为流体粘性的量度，称为动力粘性系数（动力粘度或叫绝对粘度）， μ 值大小表征粘滞性的强弱。在国际单位制中， μ 的单位为：牛·秒/米²（ $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ ），即称帕·秒（Pa·s）。

在流体力学中， μ 与 ρ 常联系在一起，故也可用如下形式的量反映液体粘滞性的大小

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

ν 称为运动粘性系数（运动粘度）。其量纲为： $[L^2/T]$ ，单位为米²/秒（ m^2/s ）或厘米²/秒（ cm^2/s ）。从量纲上看， μ 和 ν 的命名读者是不难理解的。

流体粘性系数与流体种类有关，并随压强和温度而变。通常情况下压强对粘性系数影响不大，可不考虑。温度对粘性系数的影响，就气体和液体来说是不同的。从微观上分析，粘滞性来源于分子的内聚力（凝聚力）和分子热运动中的动量交换。气体分子内聚力小到可以忽略，因此气体粘滞性可以说完全是由于分子热运动中动量交换的结果，温度增加，气体分子热运动加剧，动量交换更为频繁，因此气体粘性系数随温度的升高而增加。与此相反，液体分子内聚力强，虽也有缓慢地迁移运动和微弱的动量交换，但液体的粘滞性主要来源于内聚力。温度升高，分子间距增大，内聚力相应就减小，因此，液体粘性系数随温度的升高而下降。液体的 μ 值与温度的关系可按式计算^[3]

$$\mu_t = \mu_0 / (1 + A_1 t + B_1 t^2) \quad (1-12)$$

式中： μ_0 为 0℃ 时该液体的粘性系数； μ_t 为 t （℃）时的粘性系数； A_1 、 B_1 为常数，随液体种类而异。对水来讲， $\mu = 0.001792 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ， $A_1 = 0.03368$ ， $B_1 = 0.000221$ 。

常用的水的运动粘性系数可查表 1-2。几种常见液体的 μ 值见表 1-3。

式(1-10)中 $\frac{du}{dy}$ 表示各流层的速度沿 y 方向上的变化率，称为流速梯度，但从粘性变形的意义来看，它表征液体质点的剪切变形速度（切变率）。在图 1-1 中，取方形质点 ABCD 来分析。由于流层间存在相对运动，经过 dt 时间后，该质点因剪切变形，变成平行四边形 A'B'C'D'，设剪切变形量（角变形量）为 $d\theta$ ，显然

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

表 1-2

水的运动粘滞性系数 ν (单位: cm^2/s)

C	ν	C	ν	C	ν
0	0.0179	13	0.0120	50	0.00549
1	0.0173	14	0.0117	55	0.00506
2	0.0167	15	0.0114	60	0.00469
3	0.0162	16	0.0111	65	0.00436
4	0.0157	17	0.0108	70	0.00406
5	0.0152	18	0.0106	75	0.00380
6	0.0147	19	0.0103	80	0.00357
7	0.0143	20	0.0100	85	0.00336
8	0.0139	25	0.00894	90	0.00316
9	0.0135	30	0.00801	95	0.00299
10	0.0131	35	0.00723	100	0.00284
11	0.0127	40	0.00660		
12	0.0124	45	0.00599		

表 1-3

几种常见液体的 μ 值表(μ 值以 $10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 计)

液 体	酒 精	氯 仿 三氯甲烷	甘 油	四氯化碳	苯	汽 油	煤 油	水 银
μ 值	0°C	1.78	0.70	12100	1.35	0.91		1.685
	20°C	1.197	0.67	1490	0.972	0.647	0.29	1.554

因此,剪切变形速度(角变速度或称角变率)为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

与(1-10)式相结合,可得

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-14)$$

上式表明,液体中切应力与切变率成比例。这是牛顿内摩擦定律的另一种表述方式,它揭示了液体变形运动中的一个带普遍性的规律。

流体有多种多样,多数分子结构简单的液体(如水、酒精、苯、各种油类、水银等)和一般气体都遵循牛顿内摩擦定律,这类流体统称牛顿流体。牛顿流体中的 τ 与 du/dy 之间存在线性关系,如图 1-2 中的 A。凡不适用牛顿内摩擦定律的流体都属非牛顿流体。非牛顿流体的种类很多,按流变特征,可分为三类^[4]:

(1)塑性流体。塑性流体的切应力可表达为

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-15)$$

式中: τ_0 为初始应力(初始屈服应力); η 为非牛顿流体的粘滞性系数(塑性系数)。

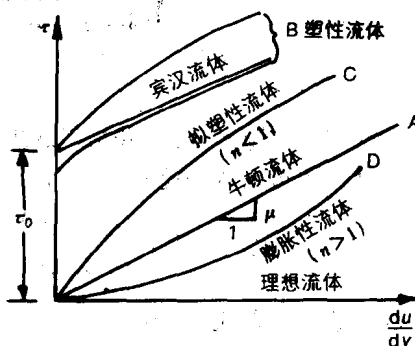


图 1-2

如 $n=1$, 即为宾汉(Bingham)流体。泥浆、血浆等是宾汉流体。

(2) 拟塑性流体。这种流体的切应力表达式为

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (1-16)$$

其特点是 η 随切变率 du/dy 的增加而减小。属于这类流体的有胶溶液(如明胶, 动物胶等), 橡胶, 纸浆, 血液, 牛奶, 水泥浆等。

(3) 膨胀性流体(胀塑性流体)。这种流体的切应力表达式仍为式(1-16)。不同之点是指数 $n > 1$, η 随切变率 du/dy 的增加而增大。属于这类流体的有生面团, 水中的浓糖溶液, 浓淀粉糊等。

非牛顿流体在工业上及工程上的用途日益扩大, 引起了科技工作者的重视和广泛而深入地研究^[5], 现已形成一门新兴的科学——非牛顿流体力学。

通过以上讨论, 我们知道粘滞性是流体所固有的特性, 但在以后的研究中, 为了使问题简化, 在某些情况下, 由于粘滞性对流动的影响并不显著, 有可能容许忽略流体的粘滞性, 这种可以忽略粘滞性的流体称为理想流体, 不能忽略的称粘性流体。即使对于粘滞性不能忽略的流体, 也常可借助于理想流体的概念来探求流体运动的基本规律, 然后再通过实验, 将由于略去粘滞性作用所引起的误差加以校正。从而大大简化了理论分析过程, 但并不影响应得的精度。当然, 实际中并不存在“理想流体”, 它仅仅是为便于研究流体的运动而引入的一个概念。

[例题 1-2] 如图 1-3 所示, 气缸内壁的直径 $D=12\text{ cm}$, 活塞的直径 $d=11.96\text{ cm}$, 长 $L=14\text{ cm}$, 润滑油的 $\mu=0.1\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, 活塞往返运动的速度为 1 m/s , 试问作用在活塞上的粘滞力为多少?

解: 因粘性作用, 粘附在气缸内的润滑油层速度为零, 粘附在活塞外沿的润滑油层与活塞速度相同, 即 $v=1\text{ m/s}$ 。因此, 润滑油层的速度由零增至 1 m/s , 油层间由相对运动产生切应力, 故用 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 计算。该切应力乘活塞面积, 就是作用于活塞上的粘滞力 T 。

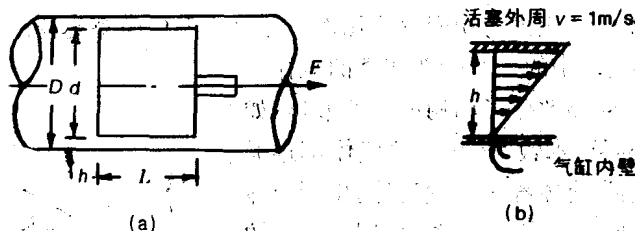


图 1-3

我们将间隙 h 放大, 并给出速度分布图(图 1-3(b))。由于活塞与气缸的间隙 h 很小, 速度分布图可以认为是直线分布。故

$$\frac{du}{dy} = \frac{v}{h} = \frac{100}{\frac{1}{2} \times (D - d)} = \frac{100}{\frac{1}{2} (12 - 11.96)} = 5 \times 10^3 \text{ 1/s}$$

将以上数值代入式(1-10)

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = 0.1 \times 5 \times 10^3 = 5 \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

$$\text{接触面积 } A = \pi dL = \pi \times 0.1196 \times 0.14 = 0.053 \text{ m}^2$$

所以

$$T = A\tau = 0.053 \times 5 \times 10^3 = 26.5 \text{ N}$$

四、液体的表面张力

物理学从分子力的观点,对液体的表面张力已作了说明。从宏观上看,液体的自由表面能承受极其微小的张力,这种张力称表面张力。表面张力不仅在液体和气体接触的周界面上发生,而且还会在液体与固体(汞和玻璃等),或一种液体与另一种液体(汞和水等)相接触的周界面上发生。

表面张力是液体的特有性质。这是因为处于周界面附近的液体,分子间相互作用的各向异性而产生的。表面张力表现在液体周界面上任意的曲线或直线上的拉应力,它的大小可用表面上单位长度所受的张力,即表面张力系数 σ 来表示,常用单位为牛顿/米(N/m)。液体的表面张力系数 σ 常随温度的升高而减小,水在20℃时的 σ 为0.073 N/m。

在工程实践中,由于表面张力很小,一般地说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,如液体在细密的多孔介质中流动(土壤中的地下水)、液体表面和固体壁面相接触、液体的自由射流等才必须考虑。

最后说明一下,本教材使用的是国际单位制。根据国际单位制的规定,质量的单位用千克(kg),力的单位用牛顿(N)。国际单位制与工程单位制不同之处是国际单位制以质量为基础量,力是导出量。它们之间的换算关系是:1千克力=9.8牛顿。应用时,请注意各量的单位。

§ 1-4 作用于流体的力

依据不同的物理性质,作用于流体的力可分为惯性力、重力、粘滞力和表面张力等。另外,为便于分析流体的运动或平衡规律,又可根据流体上作用力的表现形式不同而分为质量力和表面力。

一、质量力

对于被作用的流体来说,如果力的作用反映在流体内部每一个质点上,这样的力便叫质量力或体积力,如重力、惯性力等。质量力的大小和流体的质量成正比。单位质量流体上所受的质量力称为单位质量力。设在 x, y, z 直角坐标系中,作用在质量为 M 的流体上的质量力为 F ,则单位质量力为 F/M 。而 F_x, F_y, F_z 分别为质量力 F 在 x, y, z 轴上的投影,于是单位质量力在各坐标轴上的分力可表示为

$$X = \frac{F_x}{M}, Y = \frac{F_y}{M}, Z = \frac{F_z}{M}$$

显然,单位质量力的量纲与加速度相同,常用单位为米/秒²(m/s²)。

二、表面力

如果力的作用不是反映在流体的每一个质点上,而是反映在外部表面或内部表面上,

这样的力便叫做表面力。如作用于流体边界上的大气压力、以及流体内部各部分之间相互作用的压力、内摩擦力等,这些力作用于流体外部或内部表面,其大小和作用面积成正比。

作用于流体的表面力,可分为垂直于作用面的正应力(即压应力)和沿作用面的切应力两种。

思考题

1. 流体具有哪些特点?
2. 密度、重度的关系如何?
3. 怎样度量流体压缩性大小? 体积弹性系数和体积压缩系数是什么关系?
4. 什么叫流体的粘滞性? 是怎样体现的? 又怎样度量粘滞性的大小?
5. 动力粘性系数和运动粘性系数有何区别? 它们的常用单位是什么? 怎样进行换算? 动力粘滞系数的物理意义是什么?
6. 液体表面张力是怎样发生的? 在流体力学上有什么重要意义?
7. 作用在流体上的力有几种? 各有何特点?

习题

1-1. 20℃时水的重度 $\gamma = 9.789 \text{ kN/m}^3$, $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$, 求其运动粘性系数 ν ; 20℃空气的重度 $\gamma = 11.82 \text{ N/m}^3$, $\nu = 0.150 \text{ cm}^2/\text{s}$, 求其粘性系数 μ 。

1-2 水的体积弹性系数 $E = 2.39 \times 10^9 \text{ Pa}$, 问压强改变多少时, 其体积才可相对压缩 1%?

1-3 已知某水流流速分布函数为 $u = u_m (\frac{y}{H})^{2/3}$, 式中 H 为水深, u_m 为水面流速, 若距壁面距离为 y , 试计算 $\frac{y}{H} = 0.25$ 及 0.50 处流速梯度。

1-4 水箱中盛有静止液体, 试问此时液体所受的单位质量力是多少?

1-5 若 $h = p/\gamma$, γ 为液体的容重, p 的量纲为 $[F/L^2]$, 试问 h 的量纲是什么?

参考文献

- [1] 薛祖绳主编. 工程流体力学. 北京: 水利电力出版社, 1985
- [2] 徐正凡主编. 水力学(上册). 北京: 高等教育出版社, 1985
- [3] 成都科技大学水力学教研室编. 水力学(上册). 北京: 人民教育出版社, 1979
- [4] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 王明甫, 黄金堂. 河流泥沙动力学. 北京: 水利电力出版社, 1981
- [5] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用. 北京: 科学出版社, 1991

第二章 流体静力学

流体静力学是研究流体处于绝对静止或相对静止状态下的力学规律及其在实际工程中的应用。

本章所提到的绝对静止是指流体整体对地球没有相对运动;相对静止是指流体整体(如装在某容器中)对地球有相对运动,但流体各部分之间没有相对运动。必须指出,这里指的静止的概念与分子运动论及哲学中的静止概念不同。那里认为没有绝对静止的事物,因为容器中液体的分子进行着复杂的分子运动,同时地球在不停地自转和公转。

研究流体静力学基本规律,对工程技术具有重要的实用价值。例如,在火电厂热力系统的各种设备上和在各种输水、输油和输气的管上,安装着许多测压仪表,这些仪表对保证电厂的正常生产具有重要作用。压力仪表制造的工作原理,就是建立在流体静力学的基本规律之上的。

本章将讨论作用在流体上的力及流体静压强的特性,并根据平衡条件来求解流体中的压强分布,进而讨论各种情况下作用在固体壁面的静总压力。

§ 2-1 流体的静压强及其特性

从实践得知,流体对与之接触的边壁或它们之间都作用着垂直于作用面向着内法线方向(内法线方向是指向作用面的方向;反之,为外法线方向)的压力。显然,压力是一种分布力,与流体接触的面上各处都有压力作用。但应注意:流体的压力总是垂直作用在与之接触的任意方向的面上,如图 2-1(a)所示。

在静止流体中,取一任意形状的流体体积如图 2-1(b)所示,用任意平面 ab 将它分割为 I、II 两部分。如取去部分 I,为保持部分 II 仍处于静止平衡状态,必须在 ab 平面上加上部分 I 作用于部分 II 上的分布力。设作用在 ab 平面中某一面积 $\Delta\omega$ 上的静止流体总压力为 ΔP 。当 $\Delta\omega$ 缩小为一点 C 时,平均压强 $\bar{p} = \Delta P / \Delta\omega$ 的极限值就叫做该点的流体静压强 p ,即

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

式(2-1)又可写在下面的形式

$$dP = p d\omega \quad (2-2)$$

对式(2-2)积分可得作用面 ω 上的静止流体的总压力 P 。

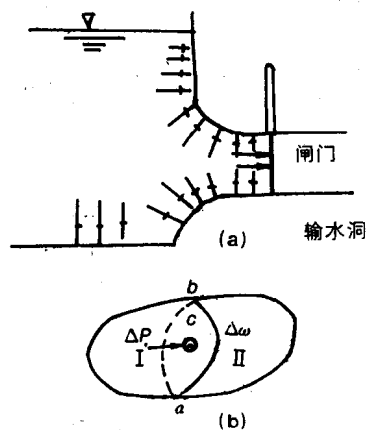


图 2-1