

高等学校教材

# 工程流体力学

(水力学)

禹华谦 陈春光 麦继婷 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

# 内 容 简 介

本书是根据高等学校土建类专业的水力学教学基本要求,并考虑目前加强理论基础、拓宽基础知识面、按大类培养的教改思想编写的。书中系统地阐述了工程流体力学(水力学)的基本概念、基本理论和基本工程应用。全书共分十章,内容包括绪论,流体静力学,流体动力学理论基础,量纲分析与相似理论,流动阻力与水头损失,孔口、管嘴和有压管道流动,明渠流动,堰流,渗流,可压缩气体的一元恒定流动等。各章均选编有一定数量的例题和习题,为便于使用,书末附有习题答案。

本书可作为高等学校土建类的土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备工程和地质工程等有关专业本科、专科(包括自学考试、函授)的教材,也可作为其它相近专业的教材和参考书。

高等学校教材  
工 程 流 体 力 学  
(水力学)

禹华谦 陈春光 麦继婷 编

\*

出 版 人 宋绍南

责任编辑 毛文义

封面设计 郑 宏

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: [cbs@center2.swjtu.edu.cn](mailto:cbs@center2.swjtu.edu.cn)

成都市报华印装厂印刷

\*

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 16.5

字数: 405 千字 印数: 1~5000 册

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-395-0/O·021

定价: 19.50 元

# 前 言

工程流体力学(水力学)是高等学校土建类各专业的一门重要技术基础课。面对科学技术的不断发展,为了更好地适应 21 世纪人才培养的要求,工程流体力学(水力学)课程的改革势在必行。本教材就是根据高等学校土建类专业的水力学教学基本要求和作者们多年的教学实践,并考虑目前加强理论基础、拓宽基础知识面、按大类培养的教改思想编写的。教材系统地阐述了工程流体力学(水力学)的基本概念、基本理论和基本工程应用。在基本理论的论述上采用总流分析与流场分析相结合的方法,并将控制体概念贯串全书。在内容选择上力求贯彻“少而精”原则,以恒定不可压缩流体为主,同时对可压缩气体动力学基础知识作了适当介绍。在计算方法上,以常见的传统方法为主,考虑到学生编程上机能力的普遍提高,并适当增加了电算要求。另外,在编写中,还力求做到基本原理、概念阐述正确清晰,重点突出,文字简明,富有启发性,便于教学和适当反映本门学科的先进水平。

为了巩固基础理论和培养学生分析计算能力,各章均精选了一定数量的例题和习题。为便于应用,书末附有习题答案。

本教材可作为高等学校土建类的土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备工程和地质工程等有关专业的本科、专科(包括自学考试、函授)的教材,也可作为其它相近专业的教材和参考书。由于书中包含了土建类各专业所需要的内容(其中打 \* 者为加深加宽内容),使用时,可根据专业要求和学时多少作必要的取舍。

本教材采取集体讨论、分工执笔的方式完成。初稿完成后,几经试用,并经多次讨论和修改,最后才形成定稿。全书由禹华谦主编,参加编写工作的有禹华谦(第一、二、三、八、十章)、陈春光(第四、六、九章)和麦继婷(第五、七章)。还有高迅、綦小平等参加了讨论工作。

黄宽渊教授、姜兴华副教授等对本书初稿提出了不少宝贵意见,另外,西南交通大学出版社对本书的出版给予了大力支持,在此一并表示衷心感谢!

由于编者知识和水平有限,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 9 月于西南交通大学

# 目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 工程流体力学的任务及发展简史	1
§ 1-2 流体的连续介质模型	2
§ 1-3 流体的主要物理性质	3
§ 1-4 作用在流体上的力	8
§ 1-5 工程流体力学的研究方法	9
习 题	10
第二章 流体静力学	11
§ 2-1 流体静压强及其特性	11
§ 2-2 流体平衡的微分方程及其积分	13
§ 2-3 重力作用下流体静压强的分布规律	15
§ 2-4 流体压强的量测	19
§ 2-5 液体的相对平衡	21
§ 2-6 静止液体作用在平面上的总压力	22
§ 2-7 静止液体作用在曲面上的总压力	25
§ 2-8 潜体及浮体的平衡与稳定性	28
习 题	31
第三章 流体动力学理论基础	36
§ 3-1 描述流体运动的方法	36
§ 3-2 研究流体运动的若干基本概念	38
§ 3-3 流体运动的连续性方程	42
§ 3-4 理想流体的运动微分方程及其积分	45
§ 3-5 伯努利方程	46
§ 3-6 动量方程	53
§ 3-7 动量矩方程	58
§ 3-8 流体微团运动的分析	59
§ 3-9 恒定平面势流简介	64
习 题	69
第四章 量纲分析与相似理论	75
§ 4-1 量纲分析的概念和原理	75
§ 4-2 量纲分析法	77

§ 4-3	流动相似性原理 .....	81
§ 4-4	相似准则 .....	83
§ 4-5	模型试验设计 .....	85
习 题 .....		88
第五章	流动阻力与水头损失 .....	91
§ 5-1	流动阻力与水头损失的两种形式 .....	91
§ 5-2	实际流体流动的两种形态 .....	91
§ 5-3	均匀流动的沿程水头损失和基本方程式 .....	94
§ 5-4	圆管中的层流运动 .....	95
§ 5-5	圆管中的紊流运动 .....	97
§ 5-6	沿程阻力系数的变化规律及影响因素 .....	104
§ 5-7	边界层理论简介 .....	111
§ 5-8	局部水头损失 .....	113
§ 5-9	紊流扩散 .....	120
* § 5-10	绕流问题 .....	121
习 题 .....		124
第六章	孔口、管嘴和有压管道流动 .....	128
§ 6-1	孔口及管嘴恒定出流 .....	128
* § 6-2	孔口(或管嘴)的变水头出流 .....	132
§ 6-3	短管的水力计算 .....	133
§ 6-4	长管的水力计算 .....	138
§ 6-5	管网水力计算基础 .....	144
§ 6-6	离心式水泵及其水力计算 .....	150
* § 6-7	水击简介 .....	153
习 题 .....		156
第七章	明渠流动 .....	162
§ 7-1	明渠的分类 .....	162
§ 7-2	明渠均匀流 .....	163
§ 7-3	明渠恒定非均匀流动的若干基本概念 .....	173
§ 7-4	水跃和跌水 .....	179
§ 7-5	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程 .....	183
§ 7-6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析 .....	185
§ 7-7	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算 .....	190
* § 7-8	天然河道中水面曲线的计算 .....	196
习 题 .....		199
第八章	堰 流 .....	203
§ 8-1	堰流的定义及分类 .....	203
§ 8-2	堰流基本公式 .....	204
§ 8-3	薄壁堰 .....	206

* § 8-4	实用断面堰 .....	208
§ 8-5	宽顶堰 .....	209
§ 8-6	小桥孔径水力计算 .....	212
§ 8-7	消力池水力计算 .....	217
	习 题 .....	219
<b>第九章</b>	<b>渗流</b> .....	<b>221</b>
§ 9-1	渗流基本定律 .....	221
§ 9-2	地下水的均匀流和非均匀流 .....	223
§ 9-3	集水廊道和井 .....	227
§ 9-4	井群 .....	231
* § 2339-5	流网及其在渗流计算中的应用 .....	233
	习 题 .....	236
<b>第十章</b>	<b>可压缩气体的一元恒定流动</b> .....	<b>239</b>
§ 10-1	音速与马赫数 .....	239
§ 10-2	理想气体一元恒定流动的基本方程 .....	242
§ 10-3	滞止参数 .....	244
§ 10-4	可压缩气体在等截面管道中的恒定流动 .....	245
	习 题 .....	248
<b>附录 I</b>	<b>本书常用的国际单位与工程单位对照表</b> .....	<b>250</b>
<b>附录 II</b>	<b>各种粗糙面的粗糙系数 <math>n</math></b> .....	<b>251</b>
	习题答案 .....	252
	参考文献 .....	256

# 第一章 绪 论

## § 1-1 工程流体力学的任务及发展简史

工程流体力学是研究流体机械运动规律及其实际应用的一门科学。它是工程力学的一个分支。

自然界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。从力学分析的角度看,流体与固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体可以抵抗一定的拉力、压力和剪力。而流体则几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪力,即流体在很小剪力作用下将发生连续不断的变形。流体的这种宏观力学特性称为易流动性。易流动性既是流体命名的由来,也是流体区别于固体的根本标志。至于气体与液体的差别则主要在于气体易于压缩,而液体难于压缩。本书主要探讨液体的运动规律,在最后一章,也简单介绍一些可压缩气流的基础知识。

同其它自然科学一样,工程流体力学也是随着生产实践而发展起来的。早在几千年前,由于治河、农业、航运等事业的发展,人们开始了解一些水流运动的规律。如相传四千多年前的大禹治水,表明我国古代进行过大规模的治河工作。秦代在公元前 256—前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,说明当时对明渠水流和堰流已有一定的认识。一般认为,工程流体力学萌芽于公元前 250 年左右希腊科学家阿基米德(Archimedes)写的《论浮体》,该文对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。

16 世纪以后,资本主义制度兴起,生产力迅速发展,自然科学(如数学、力学)亦发生了质的飞跃。这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。18 世纪,在伽利略-牛顿力学基础上形成的古典流体力学(或称古典水动力学)得到了发展。它用严格的数学分析方法建立了流体的基本运动方程,为工程流体力学奠定了理论基础。但古典流体力学或由于理论的假定与实际不尽相符,或由于求解上的数学困难,尚难以解决各种实际问题。为了满足生产发展的需要,依靠实验和实测资料而形成的实验流体力学相应得到了发展,它为人们提供了许多计算有压管流、明渠水流、堰流等实际问题的经验公式和图表。但实验流体力学由于理论指导不足,其成果往往具有一定的局限性,难以解决复杂的工程问题。

19 世纪末以来,随着生产技术的发展,尤其是航空方面的理论和实验的迅速发展,导致了古典流体力学与实验流体力学的日益结合,逐渐形成了理论与实验并重的现代流体力学(或称流体力学)。它是建立在古典流体力学的基础上,根据古典流体力学的基本理论和现代的紊流理论、边界层理论以及量纲分析与相似理论等,结合实验、实测数据和经验公式,来探索实际流体运动的基本规律。一般将侧重于理论方面的流体力学,称为理论流体力学;侧重于应用的,称为工程流体力学或应用流体力学。若研究对象主要是液流,且又侧重于应用的,则称为工程

流体力学(水力学)。

近几十年来,流体力学学科随着现代生产建设的迅速发展和科学技术的进步而不断发展,研究范围和服务领域越来越广,新的学科分支亦不断涌现,如现已派生出计算流体力学、随机流体力学、环境流体力学、能源流体力学、工业流体力学等新的学科分支。所以,流体力学既是一门古老的学科,又是一门富有生机的学科。

本书根据土建专业大类的需要,主要介绍一些工程流体力学(水力学)的内容。

工程流体力学在土建工程中有着广泛的应用。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,经过净化和消毒处理后,再通过管路系统把水输送到各用户,有时,为了均衡负荷,还需要修建水塔。这样,就需要解决一系列工程流体力学问题,如取水口的布置、管路布置、水管直径和水塔高度等的计算,水泵容量和井的产水量计算等等。又如在供热通风及燃气工程设计中,同样需要解决一系列工程流体力学问题,如热的供应、空气的调节、燃气的输配、排毒排湿、除尘降温的设计计算等等。在修建铁路及公路、开凿航道、设计港口等工程时,也必须解决一系列工程流体力学问题,如桥涵孔径的设计,站场、路基排水设计,隧道及地下工程通风和排水设计以及高速铁(公)路隧道洞型设计等等。

随着生产的发展,还将会不断地提出新的课题。相信在今后的社会主义现代化建设事业中,工程流体力学将会发挥更大的作用,学科本身也将会得到更大的发展。

## § 1-2 流体的连续介质模型

流体是由大量不断地作无规则热运动的分子所组成。从微观的角度看,由于分子之间存有空隙,因此流体的物理量(如密度、压强、流速等)在空间上的分布是不连续的;同时,由于分子作随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。

现代物理学研究表明,在标准状况下,1 cm<sup>3</sup> 液体中约含有  $3.3 \times 10^{22}$  个分子,相邻分子间的距离约为  $3.1 \times 10^{-8}$  cm; 1 cm<sup>3</sup> 气体约含有  $2.7 \times 10^{19}$  个分子,相邻分子间的距离约为  $3.2 \times 10^{-7}$  cm。可见,分子间的距离是相当微小的,在很小的体积中已包含了难以计数的分子。在一般工程中,所研究流体的空间尺度远比分子尺寸大得多,而且要解决的实际工程问题又不是流体微观运动的特性,而是流体的宏观特性,即大量分子运动的统计平均特性。基于上述原因,1753 年瑞士学者欧拉(L. Euler)提出了一个基本假说,即认为流体是由其本身质点毫无空隙地聚集在一起、完全充满所占空间的一种连续介质。把流体视为连续介质后,流体运动中的物理量均可视为空间和时间的连续函数,这样,就可利用数学中的连续函数分析方法来研究流体运动。实践证明,采用流体的连续介质模型,解决一般工程中的流体力学问题是可以满足要求的。

为了深入了解连续介质概念,现讨论某点处流体的密度。如图 1-1a 所示,取包含  $A(x, y, z)$  点的微元体积  $\Delta V$ , 在此体积中的流体质量为  $\Delta m$ , 则其相应的平均密度为  $\Delta m / \Delta V$ 。图 1-1b 示出了平均密度  $\Delta m / \Delta V$  对  $\Delta V$  的实验结果。

当  $\Delta V$  过大时,由于物质在空间分布的不均匀性,引起  $\Delta m / \Delta V$  的变化,如曲线右端所示;当  $\Delta V$  逐步缩小时,起初, $\Delta m / \Delta V$  随  $\Delta V$  的缩小趋于一确定的极限值,这是因为  $\Delta V$  越小,包

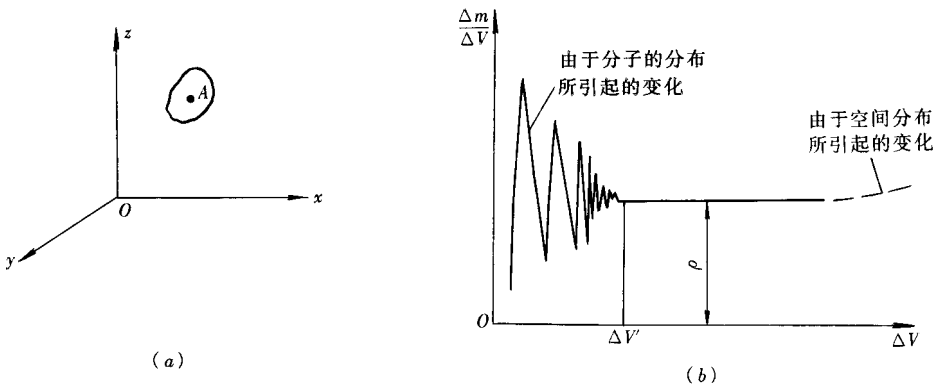


图 1-1

含于  $\Delta V$  内的分子愈来愈均匀之故。但是,当  $\Delta V$  进一步收缩到比  $\Delta V'$  更小时,其中所含的分子数较少,由于随机进出微元体积的分子数不能随时平衡,使其所含质量  $\Delta m$  时大时小,从而导致平均密度  $\Delta m/\Delta V$  也时大时小,表现出分子的随机运动特性。由此可见, $\Delta V'$  是一种几何尺寸非常小但仍包含有大量分子的特征体积(或界限体积),在此体积中,流体的宏观密度就是其中足够多分子的统计平均值。

我们把  $\Delta V'$  中所有流体分子的集合称为流体质点或流体微团。因此,连续介质中的一“点”,实际上是指一块微小的流体团,而连续介质本身则是由无限多微团所组成。由此,我们定义  $A$  点处的密度为

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

在宏观上  $\Delta V'$  可以视为 0,则上式表示为

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

在任意时刻,空间任意点上流体质点的密度都具有确定数值,一般可写为

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

即密度是空间坐标点  $(x, y, z)$  和时间  $t$  的函数。流体的其它宏观物理量也可作类似的分析和表述。

## § 1-3 流体的主要物理性质

流体运动的规律,除与外部因素(如边界的几何条件及动力条件等)有关外,更重要的是取决于流体本身的物理性质。因此,在研究流体平衡与运动之前,首先讨论流体的主要物理性质。

### 1. 密度和重度

流体和固体一样,也具有质量和重量。

流体的密度是指单位体积流体所具有的质量。对于均质流体,设体积为  $V$  的流体具有的质量为  $m$ ,则密度  $\rho$  为

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

密度的量纲为  $ML^{-3}$ ,其国际单位为公斤/米<sup>3</sup>( $kg/m^3$ )。密度也称体积质量。

均质流体的重度  $\gamma$  是指单位体积流体所具有的重量,即

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

重度(或称容重、体积重量)的量纲为  $ML^{-2}T^{-2}$ ,其国际单位为牛顿/米<sup>3</sup>( $N/m^3$ )。由于重度与重力加速度  $g$  有关,所以随在地球上的位置而变化。在工程流体力学计算中一般采用  $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ 。

纯净水在 1 个标准大气压<sup>①</sup>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。在工程计算中,为简便起见,通常取淡水的密度  $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ ,重度  $\gamma = 9.80 \text{ kN/m}^3$ 。

表 1-1 水的密度和重度

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

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	133 280	6 664~7 350	7 778.3	15 600	9 996~10 084
温度( $^{\circ}C$ )	20	0	15	15	20	15

## 2. 粘 性

流体在运动状态下抵抗剪切变形速率能力的性质,称为粘滞性或简称粘性。粘性是流体的固有属性,是运动流体产生机械能损失的根源。

现用牛顿(I. Newton)平板实验来说明流体的粘性。

设面积为  $A$  的两平行平板相距  $h$ ,其间充满了流体,下板固定不动,上板受拉力  $T$  的作用,以匀速  $U$  向右运动(图 1-2a)。由于流体质点粘附于板壁上,故下板上的流体质点的速度为零,而上板上的流体质点的速度为  $U$ 。当  $h$  或  $U$  不是太大时,两平板间沿板的法线方向,流速呈线性关系,如图 1-2a 所示,即

<sup>①</sup> 1 标准大气压 = 101 325 帕(Pa)。

$$u(y) = \frac{U}{h}y \quad (1-4)$$

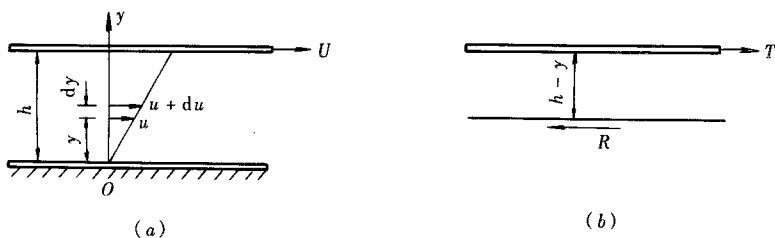


图 1-2

实验表明,对于大多数流体(包括水在内)存在下列关系:

$$T \propto \frac{AU}{h}$$

若引用一比例系数  $\mu$ ,称为粘度(也称粘性系数)或动力粘度,上式改写为

$$T = \mu \frac{AU}{h}$$

则得粘附于上板的流层的切应力  $\tau$  为

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1-5)$$

再研究任一流层上的切应力。在距下板  $y$  处作一个同上下板平行的平面,取上部流体为隔离体,如图 1-2b 所示,由平衡条件得

$$R = T$$

由此可知,任一流层上的切应力均为  $\tau$ 。

如图 1-2b 所示,力  $R$  是下部流体对上部流体的阻力,其方向与  $U$  相反。根据牛顿第三定律,上部流体对下部流体的作用力亦为  $R$ ,但方向与  $U$  相同,上下部流体在  $y$  平面上的这一对相互作用的剪力,即为粘滞力或摩擦力。由此可见,流体作相对运动时,必然在内部产生剪力以抵抗流体的相对运动,流体的这一特性,即为粘性。

由于两平板间的流速分布为线性关系,故有

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h}$$

因此可将式(1-5)改写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式(1-6)即为著名的牛顿内摩擦定律。式中  $du/dy$  为流速梯度,它表示流速沿垂直于流速方向  $y$  的变化率,实质上它代表流体微团的剪切变形速率。现证明如下:

设  $t$  时刻在运动流体中相距  $dy$  的两流层间取矩形微团  $abcd$ ,如图 1-3 所示。经过  $dt$  时段后,该流体微团运动至  $a'b'c'd'$ ,因流层间存在流速差  $du$ ,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  $bc$  都发生了角变形  $d\theta$ ,其角变形速率为  $d\theta/dt$ 。因  $dt$  为微分时段, $d\theta$  亦为微量,故有

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

由此得

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

可见,流速梯度等于角变形速率,因为它是在切应力作用下发生的,故亦称为剪切变形速率。因此,牛顿内摩擦定律式(1-6)又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-6')$$

此式表明粘性即为运动流体抵抗剪切变形速率的能力。

牛顿内摩擦定律仅适用于流体的层流运动,而对某些特殊流体不适用。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、乙醇等;不符合的流体,称为非牛顿流体,如聚合物溶液、泥浆、血浆等。牛顿流体与非牛顿流体的区别,可用图 1-4 表示,其中  $\tau_0$  为初始(屈服)切应力。本书只讨论牛顿流体。

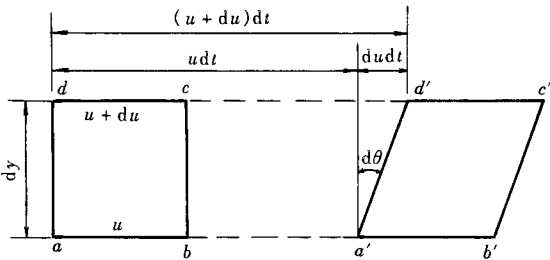


图 1-3

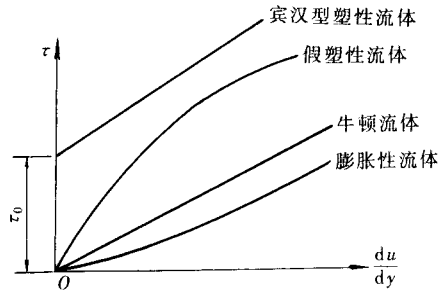


图 1-4

流体的粘性可用粘度  $\mu$  来量度。 $\mu$  值愈大,流体抵抗剪切变形的能力就愈大。 $\mu$  的量纲为  $ML^{-1}T^{-1}$ ,国际单位为牛顿·秒/米<sup>2</sup>( $N \cdot s/m^2$ )或帕·秒( $Pa \cdot s$ )。粘度主要与流体的种类和温度有关。对于液体来说, $\mu$  值随着温度的升高而减小,对于气体,则反之。这是因为粘性是流体分子间的内聚力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高,分子间的内聚力降低,而动量交换加剧。对于液体,因其分子间距较小,内聚力是决定性的因素,所以流体的粘性随温度的升高而减小;而对于气体,由于其分子间距较大,分子间热运动产生的动量交换是决定性的因素,因此气体的粘性随温度的升高而增加。

流体的粘性还可以用动力粘度  $\mu$  与流体密度  $\rho$  的比值即  $\nu = \mu/\rho$  来表示, $\nu$  称为运动粘度,其量纲为  $L^2T^{-1}$ ,国际单位为米<sup>2</sup>/秒( $m^2/s$ )。水的运动粘度可用下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (cm^2/s) \quad (1-7)$$

式中, $t$  为水温,以  $^{\circ}C$  计。其它流体的粘度可查阅有关流体计算手册。

通过以后有关流体运动的讨论可以了解,考虑流体粘性后,将使流体运动的分析变得很复杂。在工程流体力学中,为了简化分析,有时对流体的粘性暂不考虑,从而引出不考虑粘性的理想流体模型。在理想流体模型中,粘度  $\mu = 0$ ,按照理想流体模型得出的流体运动的结论,应用到实际流体时,必须考虑粘性而进行修正。

### 3. 压缩性

当作用在流体上的压强增大时,流体的宏观体积将会减小,这种性质称为流体的压缩性。压缩性的大小可以用体积压缩率  $\kappa$  或体积模量(亦称体积弹性系数,也记为  $E_v$ )  $K$  来量度。设压缩前的体积为  $V$ ,压强增加  $dp$  后,体积减小  $dV$ ,则体积压缩率定义为

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-8)$$

由于  $dp$  与  $dV$  符号始终相反,故上式等号右端加一负号,以保持  $\kappa$  为正值。 $\kappa$  值越大,则流体的压缩性越大。 $\kappa$  的单位为米<sup>2</sup>/牛顿( $m^2/N$ )。因为体积  $V$  与质量  $m$  和密度  $\rho$  有  $V = m/\rho$  的关系,且  $m$  为常量,故体积压缩率  $\kappa$  又可写成

$$\kappa = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-9)$$

体积模量  $K$  定义为体积压缩率  $\kappa$  的倒数,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (1-10)$$

其单位为帕(Pa)。

流体的  $\kappa$  或  $K$  值一般与流体的种类、压强和温度等有关。但液体的  $\kappa$  或  $K$  值随压强和温度的变化不大,因此,液体并不完全符合弹性体的胡克定律。

液体的压缩性很小,例如在  $10^\circ\text{C}$  时水的体积模量  $K \approx 2 \times 10^9$  Pa。此值说明,每增加一个大气压,水的体积相对压缩值( $dV/V$ )约为二万分之一。所以,在一般工程设计中,认为水的压缩性可以忽略,相应的水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道中水流的水击问题时,水的压缩性则必须考虑。

至于气体,其压缩性要比液体大。气体的压缩性一般还与压缩过程有关。对于理想气体(亦称完全气体),密度与压强和温度的关系遵循状态方程:

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-11)$$

式中, $T$  为热力学温度(亦称绝对温度, $T = 273 + t$ ,这里  $t$  为摄氏温度); $R$  为气体常数,单位为  $J/(kg \cdot K)$ ,空气的  $R$  值为  $287 J/(kg \cdot K)$ 。

理想气体的另一个基本方程为

$$\frac{p}{\rho^n} = C(\text{常数}) \quad (1-12)$$

式中,指数  $n$  取决于气体的压缩过程,例如  $n = 1$  为等温过程; $n = k$  为等熵过程,这里  $k$  为绝热指数(亦称等熵指数),对于空气, $k = 1.4$ 。

对式(1-12)求导并代入式(1-10),可得

$$K = np \quad (1-13)$$

可见气体体积模量  $K$  与压强  $p$  成正比,且与压缩过程有关。

但需指出,在一定条件下,如在距离不太长的输气系统中,当气流速度远小于音速时,气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略。亦就是说,此时的气体也可视为不可压缩的。否则,必须考虑气体的压缩性。

实际流体都是可压缩的,但在可以忽略流体压缩性时,引出不可压缩流体模型,可使流动分析简化。

## 4. 表面张力

表面张力是液体自由表面在分子作用半径范围内,由于分子引力大于斥力而在表层沿表面方向产生的拉力。表面张力 $\sigma$ 定义为自由表面内单位长度上所受的横向拉力,其量纲为 $MT^{-2}$ ,国际单位为牛顿/米(N/m)。 $\sigma$ 值随流体的种类和温度而变化,如对 $20^{\circ}C$ 的水, $\sigma=0.074$  N/m,对水银 $\sigma=0.54$  N/m。 $\sigma$ 也叫表面张力系数。

表面张力的数值并不大,在工程流体力学中一般不考虑它的影响。但在某些情况下,如当内径较小的管子插在液体中时,由于表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度,这种所谓的毛细管现象,是工程流体力学实验中使用测压管时所必须注意的。另外,在研究水深很小的明渠水流和堰流时,其影响也是不可忽略的。

## 5. 汽化压强

流体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化,液体汽化为蒸气。汽化的逆过程称为凝结,蒸气凝结为液体。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,水的汽化压强值见表 1-3。

表 1-3 水的汽化压强

水温( $^{\circ}C$ )	$0^{\circ}$	$5^{\circ}$	$10^{\circ}$	$15^{\circ}$	$20^{\circ}$	$25^{\circ}$	$30^{\circ}$
汽化压强(kPa)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温( $^{\circ}C$ )	$40^{\circ}$	$50^{\circ}$	$60^{\circ}$	$70^{\circ}$	$80^{\circ}$	$90^{\circ}$	$100^{\circ}$
汽化压强(kPa)	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当液体某处的压强低于汽化压强时,在该处发生汽化,形成空化现象,将对液体运动和液体与固体相接触的壁面均产生不良影响。因此,在工程中应当避免空化现象的发生。

以上讨论了流体的主要物理性质。在工程流体力学中所称的流体(实际流体),一般系指易流动的(静止时不能承受切应力)、具有粘性的、不易压缩的、均质的连续介质。在以后的讨论中,如没有特别说明,即认为是对上述流体而言。

# § 1-4 作用在流体上的力

作用在流体上的力,按其物理性质来看,有重力、摩擦力、弹性力、表面张力、惯性力等。但在工程流体力学中分析流体运动时,主要是从流体中取出一封闭表面所包围的流体,作为隔离体来分析。从这一角度出发,可将作用在流体上的力分为表面力和质量力两大类。

## 1. 表面力

作用于流体隔离体表面上、其大小与作用面积成比例的力称为表面力,它是相邻流体之间或其它物体与流体之间作用的结果。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。

如图 1-5 所示,在流体隔离体表面上取包含  $B$  点的微小面积  $\Delta A$ ,作用在  $\Delta A$  上的法向力为  $\Delta P$ ,切向力为  $\Delta T$ ,则  $B$  点处的压强  $p$  及切应力  $\tau$  分别为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-14)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \quad (1-15)$$

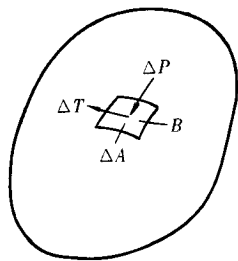


图 1-5

$p$  及  $\tau$  的量纲为  $ML^{-1}T^{-2}$ , 国际单位为帕斯卡 (Pa), 简称帕,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

顺便指出,在静止流体中,流体间没有相对运动,即流速梯度  $du/dy = 0$ , 或者在理想流体中,粘度  $\mu = 0$ 。两种情况均有  $\tau = 0$ , 作用在  $\Delta A$  上的表面力只有法向压力  $\Delta P$ 。

## 2. 质量力

作用于流体隔离体内每个流体微团上,其大小与流体质量成比例的力称为质量力。最常见的质量力是重力;此外,对于非惯性坐标系,质量力还包括惯性力。

在工程流体力学中,质量力常用单位质量力来度量。若隔离体中的流体是均质的,其总质量为  $m$ ,所受总质量力为  $F$ ,则单位质量力  $f$  为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-16)$$

若总质量力  $F$  在坐标轴上的投影分别为  $F_x, F_y, F_z$ , 单位质量力  $f$  在相应坐标轴上的投影为  $X, Y, Z$ , 则有

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{m} \\ Y &= \frac{F_y}{m} \\ Z &= \frac{F_z}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

单位质量力的量纲为  $LT^{-2}$ , 与加速度的量纲相同。

## § 1-5 工程流体力学的研究方法

工程流体力学与其它科学一样,其研究方法一般有实验研究、理论分析和数值模拟三种。

工程流体力学理论的发展,在相当程度上取决于实验观测的水平。古代流体力学的知识多半是直接从事生产实践中积累起来的。在以系统研究自然规律为直接目的的科学实验出现后,便扩大和加深了实践的范围,并在此基础上形成了近代流体力学的系统理论。在工程流体

力学中实验观测的方法主要有三个方面：一是原型观测，对工程实践中的流体流动直接进行观测；二是系统实验，在实验室内对人工流动现象进行系统研究；三是模型实验，在实验室内，以流动相似理论为指导，将实际工程缩小为模型，通过在模型上预演或重演相应的流动现象来进行研究。这三个方面有计划地进行，可以取得相互配合、补充和验证的效果。

当掌握了相当数量的试验资料后，就可以根据机械运动的普遍原理，运用数理分析的方法来建立流体运动的系统理论，并在指导生产实践的过程中加以检验、补充和发展。由于流体运动的复杂性，实际解决工程问题时，单纯依靠数理分析有时往往还很难得到所需要的具体结果，因此必须采用数理分析与试验观测相结合的方法。在工程流体力学中，有时先推导理论公式再用经验系数修正；有时是应用半经验半理论的公式；有时是先定性分析然后直接采用经验公式进行计算。

从 20 世纪 60 年代以后，随着现代电子计算机技术及其应用的飞速发展，在工程流体力学的研究中已形成了一门重要的分支学科——计算流体力学或计算水力学。它广泛地采用有限差分法、有限单元法、边界元法以及谱方法等将工程流体力学中一些难以用解析法求解的线性或非线性偏微分方程离散为数值模型，进行数值计算。虽然数值计算结果是近似的，但一般都能达到工程上要求的精度。

数值计算一般比物理模型实验在人力物力上较为节省，还具有不像物理模型受相似律限制的优点。但数值模型必须建立在物理概念正确和力学规律明确的基础上，而且需要天然或实验资料的检验。所以对于一些重要的工程流体力学问题的研究，通常采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的途径。本书主要介绍理论分析和实验研究方法。至于数值计算，本书不作介绍，读者可参阅有关计算流体力学或计算水力学书籍。

## 习 题

- 1-1 某种汽油的重度  $\gamma = 7.20 \text{ kN/m}^3$ ，求其密度  $\rho$ 。
- 1-2 若水的体积模量  $K = 2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ ，欲减小其体积的 0.5%，问需增加多大的压强？
- 1-3  $20^\circ\text{C}$  的水  $2.5 \text{ m}^3$ ，当温度升至  $80^\circ\text{C}$  时，其体积增加多少？
- 1-4 当空气温度从  $0^\circ\text{C}$  增加至  $20^\circ\text{C}$  时，运动粘度  $\nu$  增加 15%，重度  $\gamma$  减少 10%，问此时动力粘度  $\mu$  增加多少（百分数）？
- 1-5 两平行平板相距 0.5 mm，其间充满流体，下板固体，上板在 2 Pa 的压强作用下以 0.25 m/s 匀速移动，求该流体的动力粘度。
- 1-6 一封闭容器盛有水或油，在地球上静止时，其单位质量力为若干？当封闭容器从空中自由下落时，其单位质量力又为若干？

# 第二章 流体静力学

流体静力学是研究流体处于平衡时的力学规律及其在实际工程中的应用。

流体的平衡包括流体在惯性坐标系中处于静止或作匀速直线运动,也包括流体在某一非惯性坐标系中处于相对静止(亦称相对平衡)。

平衡流体的共性是流体质点之间没有相对运动。在绪论中曾经指出,流体质点之间没有相对运动时,流体的粘滞性便不起作用,故平衡流体不呈现切应力。又由于流体几乎不能承受拉应力,所以,平衡流体质点之间的相互作用是通过压应力(称为流体静压强)形式呈现出来。因此,流体静力学的主要任务便是研究流体静压强在空间的分布规律,并在此基础上解决一些工程实际问题。

## § 2-1 流体静压强及其特性

### 1. 流体静压强的定义

在平衡流体中,围绕某点取一微小作用面,设其面积为  $\Delta A$ ,作用在该面积上的压力为  $\Delta P$ ,则当  $\Delta A$  无限缩小到一点时,平均压强  $\Delta P/\Delta A$  便趋近某一极限值,此极限值就定义为该点的流体静压强,通常用符号  $p$  表示,即

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

在工程流体力学(水力学)中,规定压强用正号表示。

### 2. 流体静压强的特性

流体静压强具有两个重要特性:

(1) 流体静压强的方向沿作用面的内法线方向。兹证明如下:

在平衡流体中取出一块流体,用任意平面将其切割成两部分,则切割面上的作用力就是流体之间的相互作用力。现取下半部分为隔离体,如图 2-1 所示。假如切割面上某一点  $E$  处的静压强  $p$  的方向不是内法线方向而是任意方向,则  $p$  可以分解为切向分量  $\tau$  和法向力量  $p_n$ 。从绪论中知道,平衡流体既不能承受剪切力也不能承受拉力,否则将破坏平衡。所以  $\tau=0$ ,即流体静压强唯一可能的方向就是与作用面的内法线方向一致。

(2) 平衡流体中任一点的静压强大小与其作用面的方位无关。

为了证明这一特性,在平衡流体中任取一点  $O$ ,并设直角坐标系  $Oxyz$ 。在该坐标系上,取