

同 济 大 学 工 程 力 学 系 列 教 材

流体力学

赵毅山 程 军 编著

同济大学出版社

26

01

同济大学工程力学系列教材

流 体 力 学

赵毅山 程 军 编著



同济大学出版社

内 容 提 要

本书是根据高等学校土木工程类的流体力学课程教学要求编写的,着重阐明基本概念以及流体力学在工程上的应用。内容力求深入浅出,适合读者自学,每章后附有习题,以便读者巩固基本概念和运用基本方程解决一些实际问题。

本书共分十章,内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学,流体动力学基础,流动阻力和水头损失,孔口、管嘴出流和有压管路,明渠均匀流,明渠非均匀流,堰流,渗流。

本书可作为建筑结构类专业、环境类专业、海洋工程和给水排水等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/赵毅山,程军编著. —上海:同济大学出版社,2004.5

ISBN 7-5608-2821-3

I. 流… II. 赵… III. 工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010518 号

同济大学工程力学系列教材

流体力学

赵毅山 程 军 编著

责任编辑 解明芳 责任校对 郁 峰 封面设计 潘向葵

**出 版
发 行**

同济大学出版社

(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经 销

全国各地新华书店

印 刷

常熟大宏印刷有限公司印刷

开 本

787mm×960mm 1/16

印 张

11.5

字 数

230000

印 数

1—3100

版 次

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

书 号

ISBN 7-5608-2821-3/TB·45

定 价

17.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

流体力学是高等工科院校各专业的主要技术基础课,它研究流体的机械运动规律及其在工程上的应用。

本书从流体力学课程的基础地位出发,加深加宽理论基础,在不削弱一元流动理论的同时,加强对质点运动的分析,注意运用基本方程分析流动问题,重在培养学生分析问题的能力。

本书在叙述方法上,力求由浅入深,注重于讲清基本概念、原理和工程应用要点。为了巩固和加深对基本理论的理解,提高计算技能以及培养分析问题、解决问题的能力,各章均配有系统性的例题、习题。

课程的基本要求是:学生在学习高等数学和理论力学课程的基础上,掌握流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。学会分析计算流体的运动规律、压力分布以及变化规律。掌握流体对建筑物的作用力(矩)的计算方法及其产生的原因和影响因素。分析建筑物在流体环境载荷作用下的结构设计,了解一般工程试验理论和管路计算方法。

本书由赵毅山(第一章、第二章、第三章、第四章、第五章)、程军(第六章、第七章、第八章、第九章、第十章)编写。在编写过程中,得到同济大学航空航天与力学学院基础力学研究部的大力支持和帮助,本书由吴家龙教授、唐寿高教授审阅,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,不足之处恳望读者予以指正。

赵毅山 程军

2003年8月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 流体力学的发展概况	(1)
第二节 流体力学的研究方法	(2)
第三节 作用在流体上的力	(3)
第四节 流体的主要物理性质	(4)
第二章 流体静力学	(13)
第一节 静止流体中应力的特性	(13)
第二节 流体平衡微分方程	(14)
第三节 重力场中流体静压强的分布规律	(16)
第四节 流体的相对平衡	(20)
第五节 液体作用在平面上的总压力	(22)
第六节 液体作用在曲面上的总压力	(26)
第三章 流体运动学	(34)
第一节 描述流体运动的两种方法	(34)
第二节 流体基本概念	(37)
第三节 流体的连续性方程	(44)
第四节 流体微团运动的分析	(49)
第五节 无旋运动(无涡流)与有旋运动(有涡流)	(53)
第四章 流体动力学基础	(58)
第一节 流体的运动微分方程	(58)
第二节 元流的伯努利方程	(62)
第三节 总流的伯努利方程	(66)
第四节 有流量分流或汇流的能量方程	(72)
第五节 有能量输入输出的能量方程	(73)
第六节 总流的动量方程	(75)
第五章 流动阻力和水头损失	(84)
第一节 流动阻力和水头损失的分类及计算	(84)
第二节 粘性流体的两种流态	(85)
第三节 均匀流基本方程	(88)
第四节 圆管中的层流运动	(89)
第五节 紊流运动	(92)

第六节 沿程阻力系数的变化规律	(96)
第七节 局部水头损失	(103)
第六章 孔口、管嘴出流和有压管路	(111)
第一节 孔口出流的分类	(111)
第二节 孔口出流	(111)
第三节 液体经管嘴恒定出流	(116)
第四节 短管出流	(119)
第五节 长管的水力计算	(125)
第七章 明渠均匀流	(131)
第一节 明渠流的基本概念	(131)
第二节 明渠均匀流的特点、形成条件和水力特征	(134)
第三节 明渠水力最优断面允许流速	(136)
第四节 明渠均匀流的水力计算	(138)
第八章 明渠非均匀流	(143)
第一节 明渠流动状态	(143)
第二节 明渠流动的断面比能、临界状态和流态判别准则	(146)
第三节 明渠非均匀急变流	(150)
第九章 堰流	(157)
第一节 堰流及其特征	(157)
第二节 宽顶堰	(159)
第三节 薄壁堰	(162)
第四节 实用堰	(164)
第十章 渗流	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 渗流的基本定律——达西定律	(168)
第三节 地下水的渐变渗流	(171)
参考文献	(176)

第一章 绪 论

第一节 流体力学的发展概况

流体力学的任务是研究流体的平衡和机械运动的规律,以及这些规律在工程实际中的应用。它的研究对象是流体,也包括液体和气体。流体力学属于力学的一个分支。

流体力学的发展和其他自然学科一样,是随着生产的发展需要而发展起来的。在古代,如我国的春秋战国时期和秦朝时代,为了满足农业灌溉需要,修建了都江堰、郑国渠和灵渠,对水流运动规律已有了一些认识。同样,在古埃及、古希腊和古印度等国,为了发展农业和航运事业,修建了大量的渠系;古罗马人为了发展城市,修建了大规模的供水管道系统,也对水流运动的规律有了一些认识。当然,应当特别提到的是古希腊的阿基米德(Archimedes),在公元前 250 年左右,提出了浮体定律,一般认为是他真正奠定了流体力学静力学的基础。

到了 17 世纪前后,由于资本主义制度兴起,生产迅速发展,对流体力学的发展需要也就更为迫切。这个时期的流体力学研究出现了两个方向,当时,这两个发展途径互不联系,各有各的特色。一个是古典流体力学方向,它运用严密的数学分析,建立流体运动的基本方程,并力图求其解答,此方向的奠基人是伯努利(Bernoulli)和欧拉(Euler)。其他对古典流体力学的形成和发展有重大贡献的还有拉格朗日(Lagrange)、纳维(Navier)、斯托克斯(Stokes)和雷诺(Reynolds)等人,他们多为数学家和物理学家。由于古典流体力学中某些理论的假设与实际有出入,或者由于对基本方程的求解遇到了数学上的困难,所以,古典流体力学无法用以解决实际问题。为了适应当时工程技术迅速发展的需要,应运而生了另一个水力学方向,它采用实验手段来解决实际工程问题,如管流、堰流、明渠流、渗流等问题。在水力学上有卓越成就的都是工程师,其中包括毕托(Pitot)、谢才(Chezy)、文透里(Venturi)、达西(Darcy)、巴赞(Bazin)、曼宁(Manning)、佛罗德(Froude)等人,但是,这一时期的水力学由于理论水平不够,仅依靠实验,故在应用上有一定的局限性,难以解决复杂的工程问题。

20 世纪以来,现代工业发展突飞猛进,新技术不断地涌现,推动着古典流体力学和水力学进入了新的发展时期,并走上了融合为一体的道路。1904 年,德国工程师普朗特(Prandtl)提出了边界层理论,使纯理论的古典流体力学开始与工程实际相结合,逐渐形成了理论与实际并重的现代流体力学。随后的几十年,现代流体力学获得飞速发展,并渗透到现代工农业生产的各个领域,例如,在航空航天工业、造船工业、电力工业、水资源利用、水利工程、核能工业、机械工业、冶金工业、化学工业、采矿工

业、石油工业、环境保护、交通运输、生物医学等,都应用到现代流体力学的有关知识。土木工程专业各个领域与流体力学的关系也非常密切,例如,城市和工业用水,从开拓水渠、取水口布置、水的净化与消毒、水泵选择到水塔修建、管路布置等,都面临一系列的流体力学问题。在公路与桥梁工程中,在地下建筑、岩土工程、水工建筑、矿井建筑等土木工程各个学科中,也只有掌握好流体的各种力学性质和运动规律,才能有效地、正确地解决工程实际中所遇到的各种流体力学问题。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同,分为理论流体力学(通称流体力学)和应用流体力学(通称工程流体力学)。前者主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性。后者则侧重于解决工程实际中出现的问题,而不去追求数学上的严密性。当然,两种方法都须借助于实验研究,得出经验或半经验的公式。

第二节 流体力学的研究方法

一、连续介质模型

流体力学研究的对象是流体,从微观角度来看,流体是由大量的分子构成的,这些分子都在作无规则的热运动。由于分子之间存在空隙,流体的物理量(如密度、压强和速度等)在空间的分布是不连续的。同时,由于分子的随机运动,所以在空间任一点上,流体的物理量在时间上的变化也是不连续的。显然,以分子为对象来研究流体的运动将极为复杂。

现代物理学的研究得出,在标准状态下, 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$; 1cm^3 气体约有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。分子间距离如此微小,即使在很小的体积中,也含有大量的分子,足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

流体力学研究流体宏观机械运动的规律,也就是大量分子统计平均的规律性。1755年,瑞士数学家和力学家欧拉首先提出,把流体当作是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究,这就是连续介质模型。这里所说的质点,是指大小与一切流动空间相比是微不足道的、含有大量分子、具有一定质量的流体微元。建立连续介质模型,是为摆脱分子运动的复杂性,对流体物质结构的简化,按连续介质模型,流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的函数。这样就能用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型用于一般的流动分析是合理的,并且是有效的。但是对某些特殊的问题,如研究导弹和卫星在高空飞行的稀薄气体力学中,气体分子间距离很大,已能和飞行物的特征尺寸比拟,则连续介质模型不能成立。

连续介质模型对于学过固体力学的读者并不陌生,在材料力学和弹塑性力学中,都是把受力构件当作连续介质来研究应力和变形的规律。可以说连续介质模型是固体力学和流体力学许多分支学科中共同的理论基础。

二、流体力学的研究方法

流体力学的研究方法大体上有理论、数值和实验三种。

理论方法是通过对流体物理性质和流动特征的科学抽象,提出合理的理论模型。对这样的理论模型,根据物质机械运动的普遍规律,建立控制流体运动的闭合方程组,将实际的流动问题转化为数学问题,在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于提出理论模型,并能运用数学方法求出理论结果,达到揭示运动规律的目的。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

数值方法是在计算机应用的基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限元法等),建立各种数据模型,通过计算机进行数值计算和数值实验,得到在时间和空间上许多数字组成的集合体,最终获得定量描述流场的数值解。近二三十年来,这一方法获得很大发展,已形成一个专门学科——计算流体力学。

实验方法是通过对具体流动的观察与测量来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证,实验又需要理论来指导。流体力学的实验研究,包括原型观测和模型实验,而以模型实验为主。

上述三种方法互相结合,为发展流体力学理论与解决复杂的工程技术问题奠定了基础。

第三节 作用在流体上的力

力是造成物体机械运动的原因,因此,研究流体机械运动的规律,要从分析作用在流体上的力入手。作用在流体上的力,按作用方式的不同,分为两类,即表面力和质量力。

一、表面力

表面力是通过直接接触施加在接触表面上的力。

在运动流体中,取某流体微团(所谓流体微团,是指由大量流体质点所组成的微小流体团)为研究对象,如图 1-1 所示。周围流体对流体微团的作用,以分布的表面力代替。表面力在流体微团表面某一点的大小(集度)用应力来表示。

设 A 为流体微团表面上的一点,包含 A 点取微小面积 ΔA ,若作用在 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ,将其分解为法向分力(压力) ΔP 和切向分力 ΔT ,则

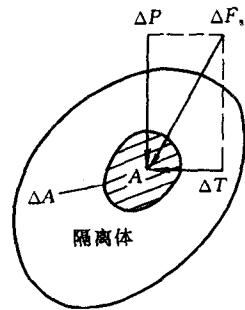


图 1-1 表面力

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (\text{为 } \Delta A \text{ 上的平均法应力})$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (\text{为 } \Delta A \text{ 上的平均切应力})$$

取极限

$$p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (\text{为 } A \text{ 点的法应力})$$

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (\text{为 } A \text{ 点的切应力})$$

应力的单位是帕斯卡(B. Pascal, 法国数学家, 物理学家, 1623—1662), 简称帕, 以符号 Pa 表示, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。

二、质量力

质量力是以隔距离作用施加在每个质点上的力。重力是最常见的质量力。除此之外, 若所取坐标系为非惯性系, 建立力的平衡方程时, 其中的惯性力如离心力、科里奥利(Coriolis)力也属于质量力。

质量力的大小用单位质量力表示。设均质流体的质量为 m , 所受质量为 F_B , 则

单位质量力为

$$f_B = \frac{F_B}{m}$$

在各坐标轴上的分量

$$X = \frac{F_{Bx}}{m}, \quad Y = \frac{F_{By}}{m}, \quad Z = \frac{F_{Bz}}{m}$$

$$f_B = Xi + Yj + Zk$$

图 1-2 重力

若作用在流体上的质量力只有重力, 如图 1-2 所示, 则

$$F_{Bx} = 0, \quad F_{By} = 0, \quad F_{Bz} = -mg$$

单位质量力

$$X = 0, \quad Y = 0, \quad Z = \frac{-mg}{m} = -g$$

负号表示重力方向与 z 轴的方向相反。

单位质量力的单位为 m/s^2 , 与加速度单位相同。

第四节 流体的主要物理性质

流体的性质是决定流动状态的内在因素, 同流体运动有关的主要物理性质是惯性、粘性和压缩性。

一、惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质,凡改变物体的运动状态,都必须克服惯性作用。

质量是惯性大小的度量,单位体积的质量称为密度,以符号 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ,质量为 m ,则

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

密度的单位是 kg/m^3 。

液体的密度随压强和温度的变化影响很小,一般可视为常数,例如水的密度为 1000kg/m^3 ,水银的密度为 13600kg/m^3 。

气体的密度随压强和温度的变化而变化,一个标准大气压下 0°C 空气的密度为 1.29kg/m^3 。

在一个标准大气压条件下,水的密度见表 1-1,几种常见流体的密度见表 1-2。

表 1-1 水的密度

温度($^\circ\text{C}$)	0	4	10	20	30
密度(kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度($^\circ\text{C}$)	40	50	60	80	100
密度(kg/m^3)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

表 1-2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度($^\circ\text{C}$)	20	20	20	20	15	15
密度(kg/m^3)	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030

二、粘性

粘性是流体固有的物理性质,可从以下三方面去认识。

1. 粘性的表象

观察图 1-3 所示两块平行平板,其间充满静止流体,两平板间距离 h ,以 y 方向为法线方向。保持下平板固定不动,使上平板沿所在平面以速度 u 运动。于是,粘附于上平板表面的一层流体随平板以速度 u 运动,并依次影响下层,使各层相继运动,直至粘附于下平板的流层,速度为零。在 u 和 h 都较小的情况下,各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

上平板带动粘附在板上的流层运动,而且能影响到内部各流层运动,表明内部各

流层之间存在着切向力,即内摩擦力,这就是粘性的表象。由此得出,粘性是流体的内摩擦特性。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿(I. Newton)1687年在《自然哲学的数学原理》中提出并经后人验证:流体的内摩擦力(切力) T 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成比例;与流层的接触面积 A 成比例;与流体的性质有关;与接触面上的压力无关。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

$$\text{以应力表示} \quad \tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式(1-2)或式(1-3)称为牛顿内摩擦定律。

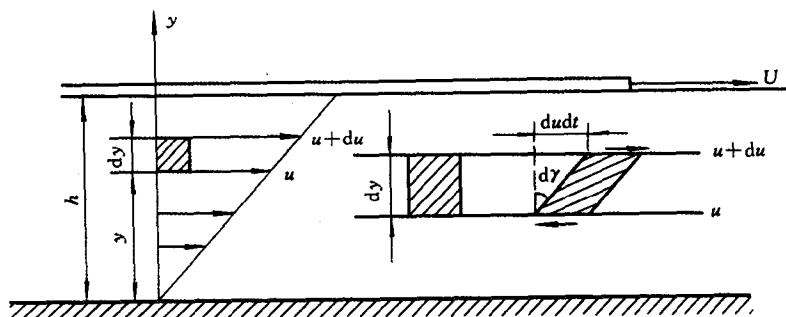


图 1-3 粘性表象

式中, du/dy 为流速在流层法线方向的变化率,称为速度梯度。为进一步说明该项的物理意义,在厚度为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团,这里,微团就是质点,只是在考虑尺度效应(旋转、变形)时,习惯上称为微团,如图1-3所示。因上、下层的流速相差 du ,经 dt 时间,微团除位移外,还有剪切变形:

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{dudt}{dy}$$

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

可知速度梯度 du/dy 实为流体微团的剪切变形速度(或剪切变形速率),牛顿内摩擦定律式(1-3)又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-4)$$

此式表明,粘性是流体阻抗剪切变形速度的特性。

μ 是比例系数,称为动力粘度,简称粘度,单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力粘度是流体粘性大小的度量, μ 值越大,流体越粘,流动性越差。气体的粘度不受压强影响,液体的粘度受压强影响也很小。粘度随温度的变化而变化,不同温度下水和空气的粘度见表 1-3、表 1-4。

表 1-3 不同温度下水的粘度

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

表 1-4 不同温度下空气的粘度

t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	t ($^{\circ}\text{C}$)	μ ($\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

在分析粘性流体运动规律时,粘度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现,将其定义为流体的运动粘度:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

运动粘度的单位为 m^2/s 。

由表 1-3、表 1-4 可见,水的粘度随温度升高而减小,空气的粘度随温度升高而

增大。其原因是,液体分子间的距离很小,分子间的引力即内聚力是形成粘性的主要因素,温度升高,分子间距离增大,内聚力减小,粘度随之减小;气体分子之间的距离远大于液体,分子热运动引起的动量交换,是形成粘性的主要因素,温度升高,分子热运动加剧,动量交换加大,粘度随之增大。

3. 理想流体

实际的流体(无论液体或气体),都是有粘性的。粘性的存在,给流体运动规律的研究带来极大的困难。为了简化理论分析,特引入理想流体概念。所谓理想流体,是指无粘性($\mu=0$)的流体。理想流体实际上是不存在的,它只是一种对流体简化的力学模型。

由于理想流体不考虑粘性,所以对流动的分析大为简化,从而容易得出理论分析的结果。所得结果,对某些粘性影响很小的流动,能够较好地符合实际;对粘性影响不能忽略的流动,则可通过实验加以修正,从而能比较简便地解决许多实际流动问题。这是处理粘性流体运动问题的一种有效方法。

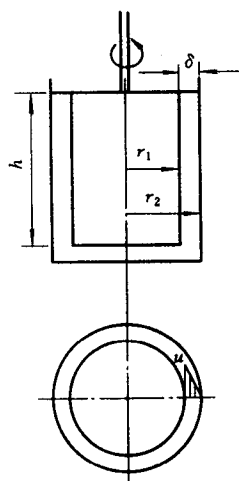


图 1-4 旋转粘度计

例 1-1 图 1-4 为旋转圆筒粘度计,外筒固定,内筒由同步电机带动旋转。内、外筒间充入实验流体,如图 1-4 所示。已知内筒半径 $r_1=1.93\text{cm}$,外筒半径 $r_2=2\text{cm}$,内筒高 $h=7\text{cm}$ 。实验测得内筒转速 $n=10\text{r/min}$,转轴上扭矩 $M=0.0045\text{ N}\cdot\text{m}$ 。试求该实验液体的粘度。

解 充入内、外筒间隙的实验液体,在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小,速度近似直线分布,不计内筒端面的影响,内筒壁的切应力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

式中

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad \delta = r_2 - r_1$$

扭矩

$$M = \tau A r_1 = \tau \times 2\pi r_1 h r_1$$

解得

$$\mu = \frac{15M\delta}{\pi^2 r_1^3 h n} = 0.952 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$$

三、压缩性

压缩性是指流体因压力、温度等因素的变化而体积发生变化的性质。流体和气体的压缩性有很大差别,下面来分别说明。

1. 液体的压缩性

液体的压缩性用压缩系数来表示。它表示在一定的温度下,增加单位压强时,体积的变化率。若液体的原体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,压缩系数为

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

由于液体受压体积减少, dp 和 dV 异号, 式中, 右侧加负号, 以使 k 为正值。其值愈大, 愈容易压缩。 k 的单位是 m^2/N 。

根据增压前后质量无变化:

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

得

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

故压缩系数也可写成

$$k = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp} \quad (1-7)$$

液体的压缩系数随温度和压强的变化而变化, 水温 0°C , 不同压强下的压缩系数见表 1-5, 表中符号 at 表示工程大气压, $1\text{at} = 98000 \text{ N/m}^2$ 。

表 1-5 水的压缩系数

压强 (at)	5	10	20	40	80
$k (\times 10^9 \text{ m}^2/\text{N})$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

注: $1\text{at} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$

压缩系数的倒数是体积模量, 即

$$K = \frac{1}{k} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-8)$$

式中, K 的单位是 N/m^2 。

在流体力学中, 常用膨胀性来表示流体因流体温度升高而体积膨胀的性质。液体的膨胀性用体膨胀系数表示。它表示在一定的压强下, 单位温度升高, 体积的变化率。若液体的原体积为 V , 温度升高 dT 后, 体积增加 dV , 则体膨胀系数为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (1-9)$$

式中, α_v 的单位是 $1/\text{K}$ 或 $1/^\circ\text{C}$ 。

液体的体膨胀系数随压强和温度的变化而变化, 水在 1 标准大气压下不同温度的体膨胀系数见表 1-6。

表 1-6

水的膨胀系数

温度(°C)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\alpha_v (\times 10^4 / ^\circ\text{C})$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

从表 1-5 和表 1-6 可知,水的压缩系数和体膨胀系数都很小。一般情况下,水的压缩性和膨胀性均可忽略不计。对于某些特殊的流动,如有压管道中的水击、水中爆炸波的传播等,压缩性起着关键作用,必须考虑水的压缩性;在液压封闭系统或热水采暖系统中,当工作温度变化较大时,须考虑体积膨胀对系统造成的影响。

2. 气体的压缩性

气体具有显著的压缩性,在一般情况下,常用气体(如空气、氮、氧、二氧化碳等)的密度、压强和温度三者之间的关系,符合理想气体状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-10)$$

式中 p ——气体的绝对压强(N/m^2);

ρ ——气体的密度(kg/m^3);

T ——气体的热力学温度(K);

R ——气体常数,在标准状态下, $R = \frac{8314}{M} (\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$; 空气的气体常数 $R =$

$287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

M ——气体的分子量。

当气体在很高的压强、很低的温度下或接近于液体时,就不能当作理想气体看待,式(1-10)不再适用。

3. 不可压缩流体

实际流体都是可压缩的,然而在许多流动中,流体密度的变化很小,可以忽略,由此引出不可压缩流体的概念。所谓不可压缩流体,是指流体的每个质点在运动全过程中密度不变化的流体。对于匀质的不可压缩流体,即密度时时、处处都不变化, $\rho = \text{常数}$ 。不可压缩流体是又一理想化的力学模型。

如前所述,液体的压缩系数很小,在相当大的压强变化范围内,密度几乎不变。由此,一般的液体平衡和运动问题都可按不可压缩流体进行理论分析。

气体的压缩性远大于液体,是可压缩流体。需要指出的是,在土木工程中常见的气流运动,如通风管道、低温烟道,管道不很长,气流的速度不大,远小于音速(约 340m/s),气体在流动过程中,密度没有明显变化,仍可作为不可压缩流体处理。

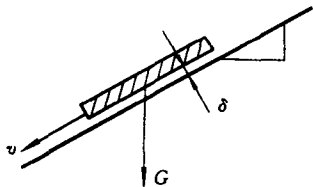
习 题

1-1 已知油的容重为 7000N/m^3 ,求其密度。

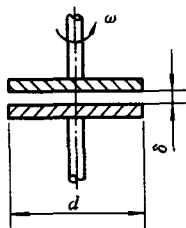
1-2 已知水的密度 $\rho=997.0\text{kg/m}^3$, 运动粘度 $\nu=0.893\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, 求它的粘度 μ 。

1-3 已知空气的容重 $\gamma=11.82\text{N/m}^3$, 粘度 $\mu=0.0183\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$, 求它的运动粘度 ν 。

1-4 一木块的底面积为 $40\text{cm}\times 45\text{cm}$, 厚度为 1cm , 质量为 5kg , 沿着涂有润滑油的斜面以速度 $v=1\text{m/s}$ 等速下滑, 油层厚度 $\delta=1\text{mm}$, 求润滑油的动力粘性系数 (粘度) μ 。



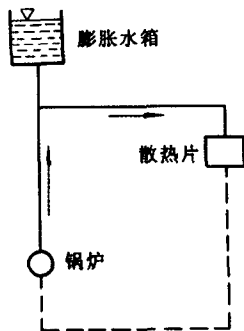
题 1-4 图



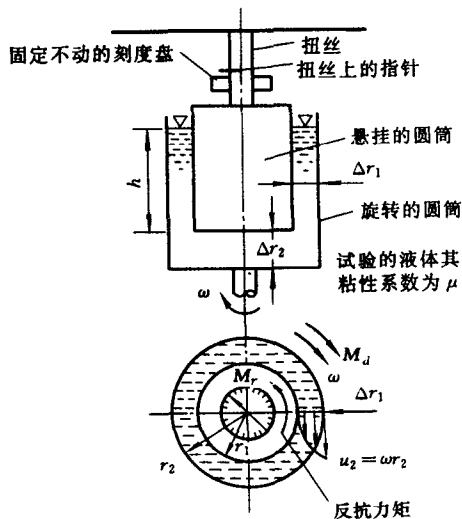
题 1-5 图

1-5 上、下两个平行的圆盘直径均为 d , 间隙厚度为 δ , 间隙中的液体动力粘性系数为 μ , 若下盘固定不动, 上盘以角速度 ω 旋转, 求所需力矩 M 的表达式。

1-6 采暖系统如图示。为了防止水温升高、体积膨胀而将水管及暖气片胀裂, 特在系统顶部设置了一个膨胀水箱, 使水有自由膨胀的余地。若系统内水的总体积为 8m^3 , 温度最大升高为 50°C , 水的温度膨胀系数 $\alpha=0.005$, 问膨胀水箱最少应有多大的容积?



题 1-6 图



题 1-7 图