

● 高等学校精品课程创新教材

工程流体力学

主编 赵存友



中国石化出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

高等学校精品课程创新教材

工程流体力学

ENGINEERING FLUID MECHANICS

主 编 赵存友
副主编 侯清泉 陈国晶
主 审 徐文娟

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了流体力学的基本原理及其在工程实际中的应用。全书共分 10 章,主要内容有:流体的主要物理性质及作用力;流体静力学基本理论及应用;流体动力学基本理论及应用;相似原理和量纲分析;管流损失(包括层流、紊流)与水力计算;孔口与管嘴出流;缝隙流、明渠流、堰流和渗流。本书各章均有一定数量的例题和习题,便于读者复习和自学。

本书可作为高等工科院校机械工程、安全工程、土木工程、采矿工程、环境工程及相近专业本科生的流体力学课程教材,也可作为从事上述专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/赵存友主编. —哈尔滨:哈尔滨
工业大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-5603-3037-2

I. ①工… II. ①赵… III. ①工程力学:流体力学
IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 108105 号

策划编辑 孙 杰
责任编辑 张 瑞
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.75 字数 374 千字
版 次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-3037-2
定 价 29.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

面对科学技术的不断发展,工程流体力学的教学内容和教学方法必须进行改革,以适应当前对人才培养的需要。工程流体力学是工程应用型高等工科院校的一门重要的专业技术基础课程,它在专业培养目标中起着“承上启下”的桥梁作用。“承上”指本课程联系已学过的基础数学、工程数学、物理学和力学;“启下”指本课程几乎联系了所有与机械工程、安全工程、土木工程、采矿工程等后续专业课程。通过本课程的学习,如果学生既能巩固或较熟练地运用基础数理知识,又能应用流体力学基础理论,在后续专业课中或工程应用中分析解决实际工程问题,也就达到了课程的学习目的。因此,在编写本教材的时候,我们本着加强基础、强调应用、提高素质的精神,除了介绍基本理论之外,还用很大篇幅介绍工程应用问题。

本书是为机械工程专业编写的工程流体力学课程教材,同时照顾到安全工程、土木工程、采矿工程等专业对工程流体力学课程内容的需要。基于专业的实际需要,书中限于讨论不可压缩流体。

编者在多年教学过程中,积累了许多有益的经验,对教材的内容进行合理的布局,以适应学校有关专业教学的需要。书中注重以下几个方面:基本概念突出、公式推导明了、内容安排深入浅出并具有启发性、举例及习题具有工程典型性。为了适应双语教学的需要,在编写教材的过程中,在重要的章节选择了一些英语习题,进行教材编写改革尝试。

本书第1章、第3章和第5章的5.6~5.11由黑龙江科技学院赵存友编写,第2章和第4章由黑龙江科技学院侯清泉编写,第5章的5.1~5.5由黑龙江科技学院朱力编写,第6章由黑龙江工程学院机电工程学院刘长喜编写,第7章由佳木斯大学周俊编写,第8章和第9章由黑龙江科技学院陈国晶编写,第10章由黑龙江科技学院姜伟编写。赵存友任主编并统稿,侯清泉、陈国晶任副主编,黑龙江科技学院教学名师徐文娟教授主审。

在编写的过程中,兄弟院校的有关同志提出许多宝贵意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。

鉴于编者知识和水平有限,书中难免有不足之处,殷切希望各位读者与专家批评、指正。

编 者
2010.3

目 录

第1章 绪论	1
1.1 工程流体力学的研究对象、任务和方法	1
1.2 流体的主要物理性质	2
1.3 流体的连续介质模型	10
1.4 作用在流体上的力	11
习题1	12
第2章 流体静力学	13
2.1 流体静压强及其特性	13
2.2 流体的平衡微分方程	15
2.3 流体静力学基本方程	18
2.4 压强单位和测压仪器	23
2.5 静止液体作用在壁面上的总压力	28
2.6 阿基米德原理及固体在液体中的浮沉问题	34
2.7 液体的相对平衡	37
习题2	42
第3章 流体动力学及工程应用	47
3.1 流体运动要素及研究流体运动的方法	47
3.2 流体流动的一些基本概念	48
3.3 流体流动的连续性方程	52
3.4 流体微元的变形与旋转	55
3.5 理想流体的运动微分方程及伯努利积分	58
3.6 理想流体微小流束的伯努利方程	61
3.7 伯努利方程式的意义	63
3.8 实际流体的伯努利方程及其工程应用	66
3.9 定常流动总流的动量方程及其工程应用	77
3.10 动量矩方程	83
习题3	85
第4章 相似原理与量纲分析	89
4.1 相似原理	89
4.2 π 定理和量纲分析的应用	94
习题4	98
第5章 管流损失和水力计算	99
5.1 流体流动与流动阻力的两种形式	99
5.2 粘性流体的均匀流动	100

5.3	流体流动两种状态	102
5.4	流体在圆管中的层流运动	105
5.5	流体在圆管中的紊流运动	110
5.6	沿程阻力系数的确定	115
5.7	非圆形截面均匀紊流的阻力计算	121
5.8	边界层理论基础	123
5.9	粘性流体的不均匀流动	127
5.10	管路计算	136
5.11	水击现象及其预防	145
	习题5	148
第6章	孔口和管嘴出流	151
6.1	孔口及管嘴恒定出流	151
6.2	孔口(或管嘴)的变水头出流	158
6.3	气穴及机械中的气穴现象	159
	习题6	161
第7章	缝隙流	163
7.1	流经平行平面缝隙的流动	163
7.2	流经倾斜平面缝隙的流动	167
7.3	流经环形缝隙的流动	169
7.4	流经平行圆盘间的径向流动	172
	习题7	175
第8章	明渠流动	177
8.1	概述	177
8.2	明渠均匀流	179
8.3	无压圆管均匀流	186
8.4	明渠流动状态	189
8.5	水跃和水跌	195
8.6	棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	199
8.7	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	206
	习题8	208
第9章	堰流	211
9.1	堰流和堰的分类	211
9.2	宽顶堰溢流	212
9.3	薄壁堰	216
9.4	实用堰溢流	218
9.5	小桥孔径的水力计算	218
	习题9	222
第10章	渗流	223
10.1	概述	223

10.2 渗流基本定律.....	223
10.3 地下水的渐变渗流.....	226
10.4 井和井群.....	229
10.5 渗流对建筑物的安全稳定性的影响.....	234
习题 10	235
参考答案.....	237
附表.....	240
参考文献.....	242

第 1 章

绪 论

本章导读 工程流体力学是一个应用广泛的学科,以受力而产生较大变形的流体作为研究对象。在研究流体运动规律时涉及很多基本概念和基础知识,应在本章学习中了解和掌握。

本章研究的中心问题是流体的物理性质、流体质点和作用于流体上的力。

本章学习要求 掌握流体的惯性、比容、粘性、压缩性和膨胀性、流体质点、理想流体等基本概念;掌握流体的连续介质模型及作用于流体上的力;了解表面张力的形成及计算。

本章是学习工程流体力学的准备阶段,所以应注重对准备知识的理解和掌握,以利于对后续知识的学习和掌握。

1.1 工程流体力学的研究对象、任务和方法

流体力学(hydraulics)是力学的一个分支。在研究物体平衡和运动的力学中,根据研究的对象不同,一般可以分为:①以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的理论力学;②以受力后产生微小变形的固体为研究对象的固体力学;③以受力后产生较大变形的流体为研究对象的流体力学。流体力学是研究流体平衡和运动的力学规律、流体与固体之间的相互作用的学科。把流体力学理论应用于工程实际当中,形成工程流体力学学科,它是工程力学的一个组成部分,属于应用科学范畴。

工程流体力学的研究对象是流体。流体是物质世界中存在最广泛的物质,有着丰富多彩的流动现象,在日常生活、工程技术的各个领域中都有着广泛的应用。根据力学中的应力理论来定义,在静力平衡时,不能承受剪切力的物质就是流体。

液体和气体统称为流体,因而,工程流体力学就包括液体力学和气体力学。液体力学通常以水作为液体的代表,故通称为水力学。水力学以液体为主要研究对象,而气体力学以气体为主要研究对象。但是,对于低速气流,当压缩性的影响所引起的误差可以略去不计时,液体的各种规律同样适用于气体。

流体的基本特征——易流动性,是由它的力学性质决定的。从力学分析的角度看,固体有能力抵抗一定数量的拉力、压力和剪切力。当外力作用于固体时,固体将产生确定的变形以抵抗外力。而流体则大不相同,处于静止状态的流体不能承受剪切力,即使在很小的剪切力的作用下也将发生连续不断的变形,直到剪切力消失为止。流体的这个性质,称为易流动性。这也是它便于用管道进行输送,适宜于做供热、制冷等工作介质的主要原

因。流体也不能承受拉力,它只能承受压力。利用蒸汽压力推动汽轮机来发电,利用液压、气压传动各种机械等,都是流体抗压能力和易流动性的应用。

由于流体的易流动性,所以流体没有固定的形状,它的形状是由约束它的边界形状所决定的,不同的边界必将产生不同的流动。因此,与流体接触的周围物体的形状和性质(也就是边界条件)对流体的运动有着直接的影响。流体的运动又总是和变形联系在一起的,当流体运动时其内部各质点之间有着复杂的相对运动。所以流体的运动和它的物理力学性质有着密切的关系,物理性质不同的流体,即使其边界条件相同也会产生不同的流动。

质量守恒定律和能量守恒定律是自然界中一切物质运动都必须遵循的普遍规律,流体作为物质的一种形态,必然也服从这些规律。

工程流体力学是一门应用较广的科学。例如,重工业中的冶金、电力、采掘等工业,轻工业中的化工、纺织、造纸等工业,交通运输业中的飞机、船舶设计,以及农田灌溉、水利建设、河道整治等工程中,无不有大量的流体力学问题需要去解决。在土建工程和环境工程中,如给水与排水、供热通风、燃气供应等,都要对水或其他流体进行净化或加热等处理,以及通过管道或渠道输送给用户或车间,在其设备和系统的设计、运行管理及施工中也会遇到一系列的流体力学问题需要解决。在评价废水、废气对环境污染的影响,设计铁路或公路的桥梁、路基排水、隧洞通风等设施时,也需要用到很多流体力学的知识。煤炭工业中的矿井通风、排水、水力采煤、水力运输、重力选煤等的理论基础,也都是流体力学。

工程流体力学是机械工程、采矿工程、安全工程、选矿工程、土木工程、环境工程等专业的一门主要技术基础课。学习本门课程,主要是掌握其分析问题的基本方法、基本理论及其应用,为液压传动、流体机械、矿井通风、建筑设备等后续课程作必要的理论准备,为生产和科研服务。

工程流体力学的研究方法包括:理论方法、实验方法和计算方法。理论方法是分析问题的主次因素提出适当的假设,抽象出理论模型(连续介质、理想流体、不可压缩流体等),运用数学工具寻求流体运动的普遍解;实验方法是将被实际流动问题概括为相似的实验模型,在实验中观察现象、测定数据并进而按照一定的方法推测实际结果;计算方法是根据理论分析与实际观测拟定计算方案,通过计算机技术求出数值解。从方法上来说,随着计算机技术的推广和应用,大大推进了工程流体力学的发展,也逐渐消除了理论流体力学和工程流体力学的差异。

1.2 流体的主要物理性质

流体的主要物理性质有惯性、粘性、压缩性、膨胀性以及表面张力特性等,是决定流体平衡和运动规律的内因。因此,必须首先对流体的物理性质有所了解。

1.2.1 惯性

惯性(inertia)是物体维持其原有运动状态的性质。惯性的大小取决于物体的质量,质量愈大,惯性愈大。物体质量的度量都是用密度来表示的。单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度,用 ρ 来表示,在国际单位制中,其单位为 kg/m^3 。

对于非均质流体,在空间某点取流体的体积为 ΔV ,其中流体的质量为 Δm ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1.2.1a)$$

对于均质流体,若其体积为 V ,质量为 m ,则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2.1b)$$

液体的密度随压强和温度的变化很小,一般可视为常数,如在工程计算中,采用水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,水银的密度为 $13\,600\text{ kg/m}^3$ 。

对于混合气体,若各组分气体的密度为 ρ_i ,所占体积的百分比为 α_i ,则其密度计算式为

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1.2.2)$$

在流体力学中还常常用到重度(specific weight)的概念,我们把流体密度与重力加速度的乘积 ρg 称为流体的重度。应当注意,流体的密度 ρ 与它和海平面的相对位置无关,而流体的重度由于与重力加速度 g 有关,因而,它将随所处位置的不同而变化。记重度为 γ ,则有 $\gamma = \rho g$ 。

单位质量的流体所占有的体积称为流体的比容(specific volume),用 v 表示。显然,它与密度互为倒数,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2.3)$$

式中 v ——流体的比容, m^3/kg ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

某液体的密度 $\rho_{\text{液}}$ 与标准大气压下 $4\text{ }^\circ\text{C}$ (严格说是 $3.98\text{ }^\circ\text{C}$) 时纯水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 的比值,称为流体的相对密度,用 S 来表示。它是无量纲的纯数,即

$$S = \frac{\rho_{\text{液}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (1.2.4)$$

至于气体的相对密度,是指某气体的密度与在特定的温度和压力下氢气或空气的密度的比值,它没有统一的规定,必须视给定的条件而定。

常用流体的密度和相对密度见附表 1。

1 标准大气压下,水在各种温度时的密度及其他性质见附表 2。

1.2.2 粘性

虽然静止流体不能承受任何切向力,但是,当流体运动时,流体内部各质点间或流体层间会因相对运动而产生内摩擦力(剪切力)以抵抗其相对运动,流体的这种性质称为粘性。此内摩擦力称为粘滞力。因此,粘性(viscosity)是流体阻止发生剪切变形的一种特性。

粘性是流体的固有属性之一,从物理学的角度看,它是由于流体分子不规则的运动在流体层间产生动量交换和流体分子间吸引力两方面原因造成的。因而,不论是静止流体还是运动流体都具有粘性。只是当流体处于静止或相对速度等于零的相对平衡时,流体

的粘性表现不出来而已,这时的内摩擦力也就等于零。由于流体粘性的存在,为了维持流体的运动就必须消耗能量来克服内摩擦力,这就是流体运动时产生能量损失的根本原因。

(1) 牛顿内摩擦定律

1686年,牛顿最早提出了流体具有粘性的假设,后人经实验使这一假设得到了验证,从而得到著名的“牛顿内摩擦定律”(Newton's law of friction)。

图 1.1 给出的是平板实验的示意图。

在宽度和长度都足够大,其边缘条件可以略去不计的互相平行的平板 I 和 II 之间充满某种流体。若板 II 固定,而拉动板 I 以某一等速 v 向右移动,这时,由于流体附着力的作用,附着在板 I 上的流体层也以速度 v 随之移动,附着在板 II 上的流体层的速度则为零。而板 I 到板 II 之间的各层流体由于质点间的内摩擦力作用,其速度沿 y 方向的变化规律如图 1.1 所示。设 F 为各流体层间产生的内摩擦力,大量实验证明,内摩擦力 F

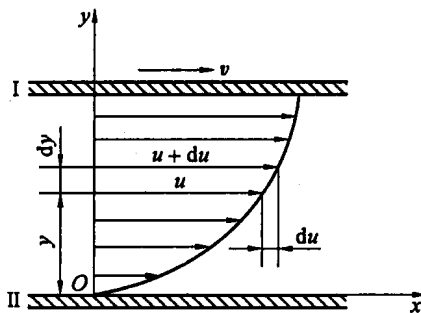


图 1.1 平行平板实验示意图

与流体的性质有关,与接触面积 A 、速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比,而与接触面上的压力无关,即

$F \propto A \frac{du}{dy}$ 。若乘以比例系数 μ ,则有

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1.2.5)$$

令 τ 为单位面积上的内摩擦力,即内摩擦应力(又称为切应力),于是

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2.6)$$

式中 F ——内摩擦力, N;

τ ——单位面积上的内摩擦力或切应力, N/m^2 ;

A ——流体层的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度,即速度在垂直于该速度方向上的变化率, s^{-1} ;

μ ——与流体性质有关的比例系数,称为动力粘性系数,或称动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

式(1.2.5)、(1.2.6)的表达式称为牛顿内摩擦定律或粘性定律。

若两平行平板间的距离 h 很小,两平板间的速度分布近似为线性,即 $\frac{du}{dy}$ 。

应当指出,牛顿内摩擦定律只能应用于流体作层状运动的情况,即所谓层流运动。

并非所有的流体都是符合牛顿内摩擦定律的。符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体(Newtonian fluid)。对于牛顿流体, τ 与 $\frac{du}{dy}$ 的函数是通过原点的直线关系。多数分子结构简单的液体(如水、酒精、汽油等)和一般气体都是牛顿流体。凡是不符合牛顿内

摩擦定律的流体称为非牛顿流体,如泥浆、有机胶体、油漆、高分子溶液等。非牛顿流体不属于普通流体力学研究的范畴,本书将不予讨论。

(2) 粘性系数

动力粘性系数(dynamic viscosity) μ 由实验测定。 μ 值越大,流体的粘性越大,相应的切应力越大;反之,亦然。另一方面,从式(1.2.6)可以看出,当速度梯度 $\frac{du}{dy}=1$ 时,在数值上 μ 等于 τ 。因此,也可以说, μ 值表示速度梯度等于1时的接触面上的切应力。

动力粘性系数 μ 的单位可由式(1.2.6)的量纲确定。设质量、长度、时间等基本量纲分别以“M”、“L”、“T”表示,则 μ 的量纲为 $ML^{-1}T^{-1}$,其国际单位为 $Pa \cdot s (N \cdot s/m^2)$,物理单位为泊(P或 $dn \cdot s/cm^2$),实际应用中常用厘泊(cP),即 $1 cP = 0.01 P$ 。 μ 的工程单位为 $kgf \cdot s/m^2$ 。它们的换算关系为

$$1 N \cdot s/m^2 = 10 dn \cdot s/cm^2 = 10 P = 0.102 kgf \cdot s/m^2$$

流体的粘性系数 μ ,由于具有动力学问题的量纲,故称为动力粘性系数。

在流体力学的分析和计算中,常出现流体的动力粘性系数 μ 与其密度 ρ 的比值,为简单起见,以 ν 表示之,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2.7)$$

由上式知, ν 具有运动学的量纲 L^2T^{-1} ,故称 ν 为运动粘性系数或运动粘度。

运动粘性系数(kinematical viscosity) ν 的国际单位和工程单位均为 m^2/s ,其物理单位为 cm^2/s ,称为“斯”(St)。实际应用中也常用厘斯(cSt),即 $1 cSt = 0.01 St$ 。它们的换算关系为

$$1 m^2/s = 10\,000 cm^2/s = 10\,000 St = 10^6 cSt$$

需要指出的是,液压油的牌号多用运动粘性系数表示。一种机械油的号数就是以这种油在 $50^\circ C$ 时的运动粘性系数的平均值标注的,号数越大,粘性就越大。例如,30号机械油,就是指这种油在 $50^\circ C$ 时的运动粘性系数平均值为 $30 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

几种常见液体在不同温度下的动力粘性系数值见附表3。

几种常见气体在 $0^\circ C$ 与1标准大气压时的粘性系数见附表4。

【例1.1】轴置于轴套中,如图1.2所示。以 $P = 90 N$ 的力由左端推轴向右移动,轴移动的速度为 $v = 0.122 m/s$,轴的直径为 $d = 75 mm$,其他尺寸如图1.2所示。求:轴与轴套间流体的动力粘性系数 μ 。

解 因轴与轴套间的径向间隙很小,故设间隙内流体的速度为线性分布,由式(1.2.5)知

$$\mu = \frac{Fh}{Av}$$

上式中 $F = P, A = \pi dl$,则

$$\mu/(Pa \cdot s) = \frac{Fh}{Av} = \frac{Ph}{\pi dl v} = \frac{90 \times 0.000\,075}{3.141\,6 \times 0.075 \times 0.2 \times 0.122} = 1.174$$

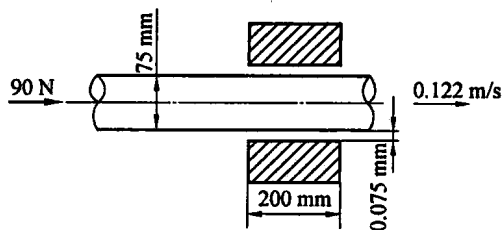


图1.2 轴与轴套

(3) 温度、压力对粘性系数的影响

压强与温度的变化,都将引起流体粘性的改变。但压强的影响较小,在一般情况下可忽略不计,仅考虑温度对粘性的影响。

水的运动粘性系数 ν 与温度的关系,可用泊肃叶和斯托克斯提出的经验公式计算,即

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1.2.8)$$

式中 ν ——水在 t °C 时的运动粘性系数, St;

t ——水的温度, °C。

气体的动力粘性系数与温度的关系可用苏兹兰特提出的经验公式确定,即

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.2.9)$$

式中 μ_0 ——气体在 0 °C 时的动力粘性系数;

T ——气体的绝对温度, $T = 273 + t$ (t 为摄氏度值), K;

C ——与气体性质有关的常数,几种常见气体的 C 值见表 1.1。

表 1.1 几种常见气体的 C 值

气体	空气	氢气	氧气	氮气	蒸汽	二氧化碳	一氧化碳
C 值	122	83	110	102	961	260	100

温度对液体和气体粘性系数的影响是截然不同的,液体的粘性随温度的升高而减小;气体的粘性则随温度的升高而增大。这是由于液体和气体的微观分子结构不同所造成的。液体产生粘性的主要原因是液体分子间的内聚力(引力),当温度升高时,分子远离,分子间的内聚力减小,所以粘性减小。气体产生粘性的主要原因是气体分子不规则热运动在相邻流体层间发生质量和动量的交换。当温度升高时,气体分子不规则热运动增强,分子交换频繁,则质量和动量交换加剧,因而粘性增大。

(4) 理想流体与实际流体

自然界中存在的流体都具有粘性,统称为粘性流体或实际流体(practical fluid)。粘性是流体流动产生阻力的内在原因,它对流体的运动有重要的影响。但是,粘性只有在流体运动时才显示出来。处于静止状态的流体,粘性不表现有任何作用。

粘性的存在,往往给研究实际流体的运动规律带来很大困难。因此,在流体力学中为了使研究的问题简化,与理论力学中引入绝对刚体的概念相类似,而引入理想流体(perfect fluid)的概念。所谓理想流体就是一种假想的无粘性的流体。当然,这种流体实际上是不存在的,它只是一个想象的物理模型。不计粘性后,对流体运动的分析就可大大简化,从而能得出一些理论分析的结果。在有些粘性影响不大的流动中,这些结果就能较好地符合实际。如果粘性的影响不能忽略,则可以通过实验加以修正,使其与实际符合。因此,把实际流体在一定条件下当作理想流体来处理,找出它的运动规律后,再考虑粘性的影响进行修正。工程流体力学就是采用这种方法研究流体运动规律的。

1.2.3 压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时,流体的体积减小,密度增加,这种性质称为流体的压

缩性,这种流体称为可压缩流体。否则称为不可压缩流体。当温度变化时,流体的体积也随之变化,温度升高,体积增大,这种性质称为流体的膨胀性。

(1) 压缩性(compressibility)

流体可压缩性的大小通常用体积压缩系数 β_p 表示。 β_p 指的是当温度一定时,压力每增加一个单位,所引起的体积相对变化量,即

$$\beta_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.2.10)$$

式中 β_p ——体积压缩系数, m^2/N ;

$\frac{dV}{V}$ ——体积的变化率(相对变化量);

dp ——压力增量, N/m^2 。

因为压力增加时体积减小,故在上式中加一负号,以保证 β_p 永为正值。

体积压缩系数 β_p 也可用密度来表示,即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.2.11)$$

由上式可知,体积压缩系数也可表示为压力增加时所引起的密度变化率。

体积压缩系数 β_p 的倒数,称为体积弹性模量(bulk modulus of elasticity),以“ E_0 ”表示。即

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad (1.2.12)$$

E_0 的单位为 N/m^2 ,体积弹性模量越大的流体越难压缩。

水是典型的液体,在 20°C ,压力为 $101.3 \sim 2\,500\text{ kPa}$ 的条件下,其体积压缩系数 β_p 仅为 $4.844 \times 10^{-10}\text{ m}^2/\text{N}$,显然很小。其他液体与水类似,其体积压缩系数也都很小。因此,在实际工程中,一般认为液体是不可压缩的。对一些特殊情况,如研究液体的振动、冲击时,则要考虑液体的压缩性。

对于气体,其体积压缩性很大,故称为可压缩流体。但是,当气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小时(如通风系统),气体的密度和重度的变化也很小,可近似地看为常数,这时,可将气体按不可压缩流体处理。本书只讨论不可压缩流体的运动规律。

【例 1.2】 在容器中压缩一种液体。当压力为 $10^6\text{ N}/\text{m}^2$ 时,液体的体积为 $1\,000\text{ cm}^3$;当压力增为 $2 \times 10^6\text{ N}/\text{m}^2$ 时,其体积为 995 cm^3 。试求:该液体的体积压缩系数 β_p 和体积弹性模量 E_0 。

解 根据式(1.2.10)得

$$\beta_p/(\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}) = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{\frac{995 - 1\,000}{1\,000}}{2 \times 10^6 - 1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-9}$$

根据式(1.2.12)得

$$E_0/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2}) = \frac{1}{\beta_p} = \frac{1}{5 \times 10^{-9}} = 2 \times 10^8$$

(2) 膨胀性(expansibility)

液体膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 表示。体积膨胀系数 β_t 是指当液体压力不变时,温度每升高1 K所引起的体积变化率 $\frac{dV}{V}$,即

$$\beta_t = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1.2.13)$$

式中 β_t ——液体的体积膨胀系数,1/K;

dT ——液体温度的增量,K。

因温度升高,体积增大,故 dT 与 dV 同符号。

液体的体积膨胀系数很小,所以,工程上一般不考虑液体的膨胀性。但是,当压力、温度的变化比较大时(如在高压锅炉中),就必须考虑液体的膨胀性。

对于气体,它不同于流体,不仅具有较大的压缩性,而且还具有明显的膨胀性。压力和温度的变化,都要引起气体密度或重度的显著改变。压力和温度的关系,可用理想气体状态方程式来描述。即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.2.14)$$

式中 p ——气体的绝对压力,N/m²;

ρ ——气体的密度,kg/m³;

T ——气体的绝对温度,K;

R ——气体常数,其值随气体种类不同而异,J/(kg·K),对于空气 $R = 287$ J/(kg·K);

对于其他气体,在标准状态下, $R = 8314/M$ (M 为气体的相对分子量)。

需要指出的是,对于实际气体,在温度不过低,压力不过高时,应用理想气体状态方程式可得出正确的结果。否则,不能应用此式,要用工程热力学中的有关图表求解。

【例1.3】 质量为1 kg的氢气,温度为-40℃,密闭在0.1 m³的容器中,求:压力为多少N/m²?

解 因氢气的相对分子质量 $M = 2.016$,则氢气的气体常数为

$$R/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) = \frac{8314}{M} = \frac{8314}{2.016} = 4124$$

$$\text{氢气的密度为} \quad \rho/(kg \cdot m^{-3}) = \frac{m}{V} = \frac{1}{0.1} = 10$$

根据式(1.2.14)得氢气的压力为

$$p/(N \cdot m^{-2}) = \rho RT = 10 \times 4124 \times (273 - 40) = 9.6 \times 10^6$$

空气在1标准大气压时,密度和重度随温度的变化列于表1.2中。

表1.2 空气的密度和重度(在1标准大气压时)

温度/℃	-20	0	20	40	60	80	100	200	500
密度 ρ /(kg·m ⁻³)	1.400	1.293	1.205	1.128	1.060	1.000	0.947	0.746	0.393
重度 γ /(N·m ⁻³)	13.729	12.651	11.708	10.983	10.395	9.807	9.316	7.316	3.854

1.2.4 表面张力和毛细管现象

液体虽然不能承受张力,但因其表层分子受指向液体内部的分子力作用,具有尽量缩小表面的趋势,使液体的自由表面上能够承受极其微小的张力,这种张力称为表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触的周界面上发生,而且还会在液体与固体,或一种液体与另一种液体相接触的周界面上发生,如液体中的气泡、气体中的液滴、液体的自由射流、液体表面和固体壁面相接触处等。表面张力的作用,使液体表面好像一张均匀受力的弹性薄膜,并在曲面处产生附加张力,以维持其平衡。表面张力的大小以表面张力系数 σ 来表示。表面张力系数是指作用在单位长度上的表面张力,它与流体的物理性质有关,特别是与流体的温度有关,单位为 N/m 。

几种常用液体的表面张力系数 σ 值列于表 1.3 和表 1.4 中。

表 1.3 液体的表面张力系数(N/m)

液体	接触流体	0/°C	20/°C	40/°C	70/°C	100/°C
水	空气	0.075 6	0.072 8	0.067 7	0.064 4	0.058 8
	饱和蒸汽	0.073 3	0.070 6	0.067 5	0.062 6	0.057 2
水银	真空	0.474	0.472	0.468	0.463	0.456
	空气	0.024 0	0.022 3	0.020 6	0.018 2	
乙醇	酒精蒸汽		0.022 8	0.021 0	0.018 3	0.0155

表 1.4 20 °C 时各种液体的表面张力系数

液 体	接触流体	表面张力系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
水银	空气	0.476
水银	水	0.373
10% 食盐水	空气	0.075 4
甲醇	空气	0.022 6
煤油	空气	0.023 ~ 0.032
原油	空气	0.023 ~ 0.038
液压油	空气	0.020 ~ 0.039
锭子油	空气	0.031 1

表面张力一般是很小的,在实际工程中往往忽略不计,但由于表面张力而引起的毛细管现象,则在工程中有其实际意义。

将一根直径很小的管子(例如玻璃管)插入液体中,表面张力会使管中液面上升或下降一个高度,如图 1.3 所示,这种现象称为毛细管现象。液体能在细管中上升,是因为液体分子间的内聚力小于其与管壁间的附着力,表面张力使液体上升,如水、油等,能打湿管壁,液面向上弯曲;若内聚力大于附着力,表面张力使液体下降,如水银,不能打湿管壁,液面向下弯曲。现设细管内径为 d ,液体的表面张力系数为 σ ,液体与壁面的接触角为 θ ,则管内液面上升或下降的高度 h 可由下式计算

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1.2.15)$$

式中 ρ ——液体的密度;
 g ——当地重力加速度。

如果把玻璃细管竖立在水中,如图 1.3(a) 所示,当水温为 20℃ 时,则水在管中的上升高度为 $h \approx 30/d$;如果把玻璃细管竖立在水银中,如图 1.3(b) 所示,则水银在管中的下降高度为 $h \approx 10/d$ 。 h 及 d 均以 mm 计。可见,当管径很小时, h 就可以很大。所

以,用来测定压强的玻璃细管直径不能太小,否则就会产生很大的误差。但当水柱测压管的内径大于 20 mm,水银柱测压管的内径大于 15 mm 时,则可忽略毛细管现象产生的影响。另外,在 U 形测压管内,由于两端的液面都受到相同的毛细管现象影响,相互抵消,所以可不考虑其影响。

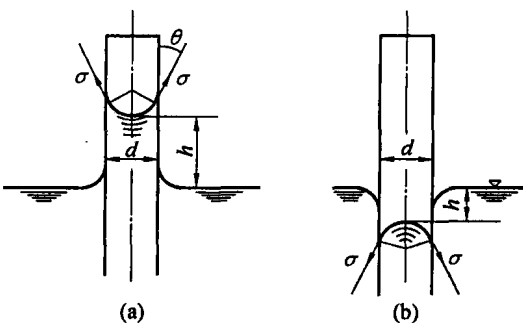


图 1.3 毛细管现象

1.3 流体的连续介质模型

从物理学中可知,流体是由大量不断运动着的分子所组成的,分子之间不仅存在间隙,而且分子内部的质量分布也是不连续的;同时,由于分子的随机运动,又导致任一空间点上的流体对于时间的不连续性。这样,从微观的角度看,流体的分布在空间和时间上都是不连续的。但是,流体力学只研究流体宏观的由外因引起的机械运动,而不是个别分子的微观运动。所以,可近似地把流体看成是由无数连续分布的流体微团组成的连续介质。流体微团虽小,但却包含了大量的分子,并具有一定的体积和质量,也就是说,流体微团是使流体具有宏观特性的允许的最小体积。这样的微团,称为流体质点(fluid particle)。

流体质点具有以下 4 层含义:

① 流体质点的宏观尺寸足够小。甚至可以小到肉眼无法观察、工程仪器无法测量的程度。

② 流体质点的微观尺寸足够大。所谓微观尺寸足够大就是流体质点的微观体积必然大于流体分子尺寸的数量级,这样在流体质点内任何时刻都包含有足够多的流体分子,个别分子的行为不会影响质点总体的统计平均特性。

③ 流体质点是包含有足够多分子在内的一个物理实体,因而在任何时刻都具有一定的宏观物理量。

④ 流体质点的形状可以任意划定,因而质点和质点之间可以完全没有间隙,流体所在的空间中,质点紧密毗邻、连绵不断、无所不在。

利用流体质点的概念,可以得出流体的连续介质模型为:流体是由连续分布的流体质点所组成,每一空间点都被确定的流体质点所占据,其中没有间隙,流体的任一物理量可以表达成空间坐标及时间的连续函数,而且是单值连续可微函数。

流体的这种“连续介质模型”,是对流体物质结构的简化,适用于特征尺寸远远大于