

工程
流体
力学

高等工科学学校试用教材

工程流体力学

高殿荣 吴晓明 编著
李久彤 主审



机械工业出版社

高等工科学学校试用教材

工程流体力学

高殿荣 吴晓明 编著
李久彤 主审



机械工业出版社

全书共分十章,内容分别为绪论,流体的主要物理性质,流体静力学,流体运动学基础,流体动力学基础,相似理论和量纲分析,流体在管道中的流动,孔口出流,缝隙流动及气体的一元流动等,并配有一定的例题和习题。

本书可作为高等工科学校机械工程、流体传动及控制、动力工程、化工、土建、环保、仪器仪表等专业的“工程流体力学”课的试用教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/高殿荣,吴晓明编著. —北京:机械工业出版社,1999. 8
ISBN 7-111-07350-9

I. 工… II. ①高… ②吴… III. 工程力学;流体力学-高等学校-教材
N. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 26169 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:吴柏青 封面设计:姚学峰

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·9 印张·214 千字
0 001—4000 册
定价:14.00 元
凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

现代高等工程教育的任务,就是要为国家培养造就出一大批既具有宽广、深厚、扎实的基础理论和技术基础理论知识,又具有创新性和创造性的面向 21 世纪的高级工程技术人才,以适应改革开放、四化建设以及知识经济时代对人才的要求。因此大学生在校学习期间,拓宽基础知识面,打好坚实的理论基础和技术理论基础是十分重要的,也是十分必要的。这也正与高等学校教学改革所提倡的“加强基础”的思想相一致。“工程流体力学”是一门基础性很强,应用范围也十分广泛的技术基础课程。它的研究领域随着生产的发展,科学的进步在不断地更新、深化和扩大,到目前为止可以说已渗透到国民经济和社会生产的各个领域。

本书是作者在多年来从事“工程流体力学”、“液压流体力学”课程的教学实践基础上编写而成的。可作为高等工科学校(包括机械制造、锻压、铸造、流体传动及控制、汽车工程、环境工程、动力工程、港口机械、农业机械、化学工程、仪器仪表、金属材料及热处理等专业)30~50 学时的“工程流体力学”试用教材,也可供有关工程技术人员参考。本书在编写过程中力求概念清晰,由浅入深,加强基础,理论联系实际。每章均配有一定的例题和习题,用来使学生巩固课堂上所学的内容,便于教学和自学。使用过程中可根据课时的多少,对课程内容做适当删简。

本书由高殿荣、吴晓明编写。高殿荣编写一、二、三、四、五、六、七章,吴晓明编写八、九、十章。全书由高殿荣统稿。在编写过程中,得到了燕山大学流体传动及控制研究所全体老师的大力支持和帮助,特别是王益群教授、赵永凯教授对书稿提出了很多宝贵意见,在此一并表示感谢。

本书由李久彤主审。

本书的出版得到了曲继方教授的鼎力相助,在此特别表示感谢。

因作者水平有限,书中缺点错误在所难免,恳请各位专家、读者批评指教。

编者

1999 年 8 月

目 录

前言

第一章 绪 论	1
第一节 工程流体力学的研究对象、内容和方法	1
第二节 工程流体力学在工程实践中的应用	1
第二章 流体的主要物理性质	3
第一节 流体的概念及连续介质假设	3
第二节 流体的密度、重度、比体积与相对密度	4
第三节 流体的热膨胀性和可压缩性	5
第四节 流体的粘性	6
习 题	9
第三章 流体静力学	11
第一节 作用于静止流体上的力	11
第二节 流体静压强及其特性	12
第三节 静止流体的平衡微分方程式	13
第四节 重力作用下静止流体中的压强分布规律	15
第五节 静压强的表示方法及其单位	17
第六节 流体的相对静止	20
第七节 静止流体对壁面作用力的计算	23
习 题	28
第四章 流体运动学基础	31
第一节 研究流体运动的两种方法	31
第二节 流体运动中的基本概念	32
第三节 连续性方程式	35
第四节 流体微团运动的分析	37
第五节 有旋流动与无旋流动、速度势函数与流函数	39
习 题	41
第五章 流体动力学基础	43
第一节 理想流体的运动微分方程式	43
第二节 粘性流体的运动微分方程式(Navier-Stokes 方程)	44
第三节 理想流体的伯努利方程式	46
第四节 实际流体总流的伯努利方程式	50
第五节 相对运动的伯努利方程式	51
第六节 伯努利方程的推广	52
第七节 伯努利方程的应用	53
第八节 动量定理及其应用	57
第九节 动量矩定理及其应用	61
习 题	65

第六章 相似理论和量纲分析	69
第一节 相似理论	69
第二节 量纲分析及其应用	72
习 题	74
第七章 流体在管路中的流动	76
第一节 管路中流体流动的两种状态	76
第二节 能量损失的两种形式	78
第三节 圆管中的层流流动	79
第四节 圆管中的湍流流动	84
第五节 进口起始段内的流动	87
第六节 非圆形断面管中的层流流动	88
第七节 管中流动沿程阻力系数的确定	89
第八节 局部阻力系数的确定	92
第九节 管路计算	95
习 题	99
第八章 孔口出流	102
第一节 孔口出流的分类	102
第二节 薄壁小孔口自由出流	103
第三节 孔口出流系数	104
第四节 厚壁孔口自由出流	105
第五节 各种管嘴的液体出流系数	106
第六节 薄壁孔口恒定淹没出流	107
第七节 变水头下的液体出流	108
第八节 空化与气蚀	109
习 题	111
第九章 缝隙流动	115
第一节 两固定平板间的层流流动	115
第二节 具有相对运动的两平行平板间的缝隙流动	117
第三节 环形间隙中的层流流动	118
第四节 两平行平板间的径向层流流动	119
习 题	122
第十章 气体的一元流动	125
第一节 声速和马赫数	125
第二节 可压缩气体的一元流动的基本方程式	127
第三节 一元气流的基本特性	128
第四节 气体在变截面管(喷管)中的流动	130
习 题	134
参考文献	136

第一章 绪 论

第一节 工程流体力学的研究对象、内容和方法

工程流体力学以流体(包括液体和气体)为研究对象,研究流体宏观的平衡和运动的规律,流体与固体壁面之间的相互作用规律,以及这些规律在工程实际中的应用。

同理论力学和材料力学一样,工程流体力学也是力学的一个重要分支。在流体力学的发展过程中,曾有过理论流体力学和工程流体力学之分,前者强调比较严密的数学逻辑推理,是连续介质力学的一个组成部分,属于基础科学范畴;后者侧重于工程应用,是工程力学的一个组成部分,属于应用科学范畴。

流体力学作为一门完整的学科发展起来是人类持续不断地与大自然进行斗争的结果。人们最早对流体知识的认识是在治理江河、农田灌溉、供水及航海等实践中开始的。在这些与自然作斗争的实践中,各国人民逐渐积累了大量有关流体运动规律的定性认识,并不断加以总结、提高和应用。公元前 2286~2278 年的大禹治水,公元前 300 年成都的都江堰灌溉工程,就是两个驰名中外的典型例子。公元前 250 年古希腊哲学家阿基米德在他的《论浮体》一书中,提出了流体静力学的定律,这是人类历史上最早的水力学著作。从 17 世纪中叶以后的 350 年中,流体力学获得了惊人的发展,它的研究内容,从单相无粘性流体的定常流动,发展到多相非牛顿流体的湍流运动,从单纯的力学发展为复杂的交叉学科,而且发展的速度越来越快。

目前,解决工程流体力学问题主要有以下三种研究方法:一是实验方法,它一般是对所研究的流动问题,选择适当的无量纲参数,建立相应的实验模型,在实验中观察流动现象,测定数据,并根据相似理论和量纲分析等方法推测实际结果。二是理论分析方法,它一般是找出影响流动问题的主要因素,并提出适当的假设,抽象出理论模型(如连续介质、理想流体、不可压缩等),再根据适当的初边值条件,运用数学工具,找出流体运动的普遍解。三是数值计算方法,这种方法对一般的流体运动方程及初始条件和边界条件,进行必要的简化,再选用适当的数值计算方法进行数值离散,编制计算程序上机计算。这三种方法互为补充,在流体力学的研究和发展中起着重要作用。

第二节 工程流体力学在工程实践中的应用

工程流体力学不仅技术基础性很强,而且应用也十分广泛。可以说几乎渗透到了人们的生产和生活的各个领域当中。例如,人们在日常生活中使用的风扇、空调、冰箱都涉及到空气及制冷介质的流动;在建筑领域中,上下水管道、采暖通风管道的设计,分析风对高层建筑的影响等都必须使用流体力学的知识;对各种流体机械如泵、风机、透平机等,为了了解和掌握这些机械的工作原理,改善其性能,提高效率,必须掌握流体力学的基本原理;各种水利工程,如葛州坝、三峡大坝及黄河小浪底等水利枢纽工程的设计和建设,不懂流体力学的知识是根本不可能的;

在机械制造、锻压、轧钢等机械设备中有很多液压、气压传动系统,它所使用的介质是流体,很多仪器仪表的测量介质也是流体;在航空航天领域,飞行器的外形设计,机翼绕流问题,升力和阻力的计算等问题都与流体力学有着密切的关系;其它像大气、海洋、航运、石油、化工、能源、环保等几乎国民经济的所有领域内,都有大量的流体力学问题。

特别是近几十年来,流体力学与其它相邻学科相结合,出现了许多新的交叉学科,如电磁流体力学,流变流体力学,化学流体力学,两相流体力学,超高声速流体力学,以及稀薄气体动力学等,极大地丰富和发展了流体力学的研究和应用领域。工程流体力学这门既古老又年轻的学科必将在人类社会的发展中发挥越来越大的作用。

第二章 流体的主要物理性质

在研究流体静止和运动的规律之前,首先要了解流体的主要物理性质。

第一节 流体的概念及连续介质假设

一、流体的概念

凡是没有固定的形状易于流动的物质就叫流体。它包括液体和气体,例如水和空气。

在常温常压下,物质可以分为固体、液体和气体三种聚集状态。它们都具有下列物质的三个基本属性:(1)由大量分子组成,(2)分子不断地作随机热运动,(3)分子与分子之间有相互作用力。不过这三个物质基本属性表现在气体、液体和固体方面却有着量和质的差别。从宏观上看同体积内所包含的分子数目,气体少于液体,液体又少于固体;同样分子间距上的分子相互作用力,气体小于液体,液体又小于固体。于是气体分子的运动具有较大的自由度,液体次之,而固体分子却只能绕自身的位置作微小的振动。这些微观的差异在宏观的表现是:气体既无一定的体积也无一定的形状,液体有一定的体积而无一定的形状,固体有一定的体积也有一定的形状。

就其力学性能而言,流体与固体的差别表现为:固体可以承受拉力、压力和切应力,液体却只能承受压力,几乎不能承受拉力,在极小的切应力作用下就会出现连续的变形流动。它只呈现对变形运动的阻力,不能自行消除变形。固体在受力后也会出现变形,但在一定范围内当作用力解除后,变形也会自动消除。液体与固体的显著区别是流动性,而气体与液体的主要差别是可压缩性的大小。气体在外力作用下表现出很大的可压缩性,而液体则不然。在通常的温度下水所承受的压强由 0.1MPa 增加到 10MPa 时,其体积仅减少原来的 0.5% ,而气体的体积与压强按波义耳—马略特定律成反比关系。可见气体的可压缩性比液体的大很多。

二、连续介质假设

根据流体的物质结构,流体是由大量的分子组成的,分子作随机的热运动,分子间有比分子尺度大很多的间距。从微观上看,在某一时刻,流体分子分散地、不连续地分布于流体所占有的空间,并随时间不连续地变化着。但是在大多数工程应用当中,人们关心的是大量分子总体的统计(即宏观)效应而不是流体单个分子的行为。当从宏观的角度来研究流体的机械运动,而不涉及微观的物质结构时,研究对象是从流体中抽象出来的模型,这种物质模型就是连续介质。在流体力学中,把流体质点作为最小的研究对象。所谓流体质点是指包含有大量流体分子,并能保持其宏观力学性能的微小单元体。从而把流体看成是由无数连续分布、彼此无间隙地占有整个空间的流体质点所组成的介质。流体宏观物理量是空间点及时间的函数,这样就可以顺利地运用连续函数和场论等数学工具研究流体平衡和运动的问题,这就是连续介质假设的重要意义。

第二节 流体的密度、重度、比体积与相对密度

流体具有质量和重量,流体的密度、重度、比体积与相对密度是流体最基本的物理量。

单位体积的流体所具有的质量称为密度,以 ρ 表示。对于均质流体,各点密度相同,即

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

式中 m ——流体的质量(kg);

V ——质量为 m 的流体所占有的体积(m^3)。

单位体积的流体所受的重力称为重度,以 γ 表示。对于均质流体,各点所受到的重力相同,即有

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

式中 G ——流体的所受的重力(N);

V ——重力为 G 的流体所占有的体积(m^3)。

流体的密度和重度有以下的关系:

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \rho = \gamma / g \quad (2-3)$$

式中 g ——重力加速度,通常取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

密度的倒数称为比体积,以 ν 表示

$$\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad (2-4)$$

它表示单位质量流体所占有的体积。

对于非均质流体,因质量非均匀分布,各点密度不同。取包围空间某点 A 在内的微元体积 ΔV ,设其所包含的流体质量为 Δm ,重量为 ΔG ,则当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, A 点的密度、重度和比体积分别为

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2-5)$$

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (2-6)$$

$$\nu_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{dV}{dm} \quad (2-7)$$

流体的相对密度是指流体的重度 $\gamma_{\text{液}}$ 与标准大气压下 4°C 纯水的重度 $\gamma_{\text{水}}$ 的比值,用 d 表示。

$$d = \frac{\gamma_{\text{液}}}{\gamma_{\text{水}}} = \frac{\rho_{\text{液}}}{\rho_{\text{水}}} \quad (2-8)$$

很明显,相对密度是一个无量纲的纯数。

几种常见物质在标准大气压下的物理性质见表 2-1。

表 2-1

液体种类	温度 t / $^\circ\text{C}$	密度 ρ /(kg/m^3)	相对密度 d	粘度 $\mu \times 10^4$ /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	饱和蒸汽压 p_v /(kPa)	体积模量 $K \times 10^{-8}$ /(Pa)
水蒸气	20	0.747	—	0.101	—	—

(续)

液体种类	温度 t / $^{\circ}\text{C}$	密度 ρ /(kg/m^3)	相对密度 d	粘度 $\mu \times 10^4$ /($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	饱和蒸汽压 p_s /(kPa)	体积模量 $K \times 10^{-6}$ /(Pa)
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7	12.1	1100
原油	20	856	0.86	72	—	—
汽油	20	678	0.68	2.9	55	—
甘油	20	1258	1.26	14900	0.000014	4350
空气	20	1.205	—	0.18	—	—
二氧化碳	20	1.84	—	0.148	—	—
一氧化碳	20	1.16	—	0.182	—	—
水银	20	13550	13.56	15.6	0.00017	26200
水	20	998	0.998	10.1	2.34	2070
熔化生铁	20	7000	7.01	—	—	—

第三节 流体的热膨胀性和可压缩性

一、热膨胀性

在一定压强下,流体体积随温度升高而增大的性质称为流体的热膨胀性。热膨胀性的大小用体积膨胀系数 α 表示,它的物理意义是单位温度变化所引起的体积的相对变化率,即

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2-9)$$

式中 α ——体积膨胀系数(K^{-1});

V ——流体的体积(m^3);

ΔV ——流体体积的增加量(m^3);

ΔT ——温度的增加量(K)。

液体的热膨胀性很小,一般可忽略不计。气体的热膨胀性相对很大,一般不可忽略。当气体压强不变时,温度每升高 1K ,体积便增大到 273K 时体积的 $1/273$ 。因此,气体的热膨胀系数 $\alpha=1/273(\text{K}^{-1})$ 。

二、压缩性

在一定温度下,流体体积随压强升高而减少的性质称为流体的压缩性。压缩性的大小用体积压缩率 κ 表示,它的物理意义是单位压强变化所引起的体积的相对变化率,即

$$\kappa = - \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2-10)$$

式中 κ ——体积压缩率(Pa^{-1});

V ——流体的体积(m^3)

ΔV ——流体体积的变化量(m^3)

Δp ——流体压强的变化量(Pa)。

由于压强增大,体积缩小, Δp 与 ΔV 变化趋势相反,为保证 κ 为正值,上式右边加一负号。并且从 κ 的表达式可以看出,当压强变化相同时,体积变化率越大, κ 也就越大,即流体越容易被压缩,而 κ 小的流体不易被压缩。因此, κ 值标志着可压缩性的大小。

体积压缩率 κ 的倒数,称为体积模量,以 K 表示。

$$K = \frac{1}{\kappa} = - \frac{V \Delta p}{\Delta V} \quad (2-11)$$

式中符号意义同前。

纯液体的体积压缩率很小。当压强在 $0.1 \sim 50 \text{MPa}$ 以及温度在 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 范围内时,水的体积压缩率约为二万分之一。对于工程中常用的矿物系液压油, K 值随压强变化不大。但如果油中混入气体,压缩性将显著增加。通常油中没有混入空气时,可取 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$ 。当油中混入 1% 的气体时, K 值将降到原来的 5% 左右;当油中混有 5% 的空气时, K 值将降到纯油的 1% 左右。

气体的情况比液体的复杂得多,一般需要同时考虑压强和温度对气体密度的影响,才能确定 κ 或 K 值。例如,等温过程时, $p/\rho = C$, $K = p$;等熵过程时, $p/\rho^n = C$, 这里 n 为等熵指数, $K = n p$ 。

根据流体的密度或体积随温度和压强变化的不同程度,通常把流体分为可压缩流体和不可压缩流体两种。对于液体,由于其密度随温度和压强的变化量很小,可以视为常量,即可看作为不可压缩流体。气体的密度随温度和压强的变化很大,是可压缩流体。但是当气体在流动过程中,若流速不高(小于 $70 \sim 100 \text{m/s}$),由于压强和温度变化不大,因此密度的变化极小,这时也可把气体看作不可压缩流体。

第四节 流体的粘性

一、粘性的定义及牛顿内摩擦定律

流体流动时,在流体内部产生阻碍运动的摩擦力的性质叫流体的粘性。粘性是流体物理性质中最重要的特性。流体产生粘性的最主要的原因有两条:一是流体分子之间的吸引力产生阻力;二是流体分子作不规则的热运动的动量交换产生阻力。

设有两平行平板,相距为 h ,其间充满液体,如图 2-1 所示。假设下板固定,上板在外力作用下以匀速 v_0 向右运动。与两板相接触的流体由于附着力的作用必粘附于两平板上,具有与平板相同的运动速度。因此与上平板相接触的一层流体将以速度 v_0 随上板一起向右运动,而紧贴下板的一层流体将和下板一样静止不动。介于两板之间的各层流体将以自上而下逐层递减的速度向右运动。流动较快的流体层带动较慢的流体层,同时流动较慢的流体层又阻滞流动较快的流体层,从而在流体层之间产生内摩擦力。

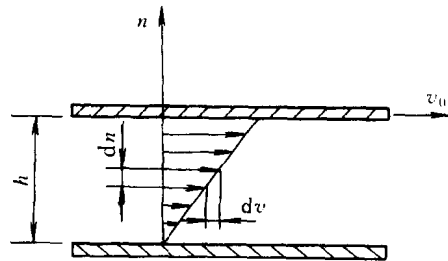


图 2-1

牛顿经实验研究发现,流体运动产生的内摩擦力与沿接触面法线方向的速度变化(即速度梯度)成正比,与接触面的面积成正比,与流体的物理性质有关,而与接触面上的压强无关。这个关系式称为牛顿内摩擦定律,即

$$F = \mu A \frac{dv}{dn} \quad (2-12)$$

式中 F ——流体层接触面上的内摩擦力(N);

A ——流体层之间的接触面积 (m^2);

dv/dn ——速度梯度 ($1/\text{s}$);

μ ——表示流体物理性质的一个比例常数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

若以单位面积上的内摩擦力(切应力) τ 表示,则牛顿内摩擦定律可以表示为

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dn} \quad (2-13)$$

考虑到 dv/dn 可正可负,为保证 τ 为正值,当 $dv/dn > 0$ 时取正号,当 $dv/dn < 0$ 取负号。通常把满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,此时 μ 不随 dv/dn 而变化,否则称为非牛顿流体。本书主要讨论牛顿流体。

二、粘性的表示方法及其单位

流体粘性的大小以粘度来表示和度量,粘度可分为以下三种:

1. 动力粘度 μ 从牛顿内摩擦定律可得

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dn} \quad (2-14)$$

动力粘度表示单位速度梯度下流体内摩擦应力的大小,它直接反映了流体粘性的大小。在 SI 制中, μ 的单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (称为帕秒)。过去沿用的动力粘度单位还有泊(P)或厘泊(CP),它们的换算关系为 $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 1000\text{CP}$ 。

2. 运动粘度 ν 在流体力学中,动力粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值称为运动粘度,以 ν 表示。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-15)$$

在 SI 制中, ν 的单位为 m^2/s 。运动粘度的非法定单位还有 cm^2/s 称为斯(St),其百分之一称为厘斯(cSt)

$$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$$

3. 恩氏粘度 $^\circ E$ 恩氏粘度是一种相对粘度,它仅适用于液体。恩氏粘度值是被测液体与水的粘度的比较值。其测定方法是:将 200mL 的待测液体装入恩氏粘度计中,测定它在某一温度下通过底部 2.8mm 标准小孔口流尽所需的时间 $t_1(\text{s})$,再将 200mL 的蒸馏水加入同一恩氏粘度计中,在 20°C 标准温度下,测出其流尽所需时间 t_2 (约为 50s),时间 t_1 与 t_2 的比值就是该液体在该温度下的恩氏粘度。即

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-16)$$

恩氏粘度 $^\circ E$ 是无量纲数。当 $^\circ E > 2$ 时,它与运动粘度 ν 有如下的经验公式

$$\nu = (7.13^\circ E - \frac{6.31}{^\circ E}) \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-17)$$

三、粘度的变化规律

流体粘度随温度和压强而变化,由于分子结构及分子运动机理的不同,液体和气体的变化规律是截然相反的。

液体粘度大小取决于分子间的距离和分子引力。当温度升高或压强降低时液体膨胀,分子间距增加,分子引力减小,粘度降低。反之,温度降低,压强升高时,液体粘度增大。

气体分子间距较大,内聚力较小,但分子运动较剧烈,粘性主要来源于流层间分子的动量交换。当温度升高时,分子运动加剧,所以粘性增大;而当压强提高时,气体的动力粘度和运动粘度减小。

四、理想流体和实际流体

具有粘性的流体叫实际流体(也叫粘性流体),流体都是有粘性的。由于粘性的存在,使得对流体的研究变得很复杂。为便于理论分析,在流体中引入理想流体的概念。所谓理想流体就是假想的没有粘性($\mu=0$)的流体。这一假设的引入大大简化了分析,容易得到流体运动的规律。对那些粘性不起主要作用的问题,忽略粘性的影响所得到的结果,能比较精确地反映实际流动的情况。对于必须考虑粘性作用的问题,如流动的压力损失等,则可以专门对粘性的作用进行理论分析和实验研究,然后再对理想流体的分析结果进行修正和补充,得到实际流体的运动规律,这已被实践证明是行之有效的分析方法。

[例 2-1] 已知某液体的动力粘度 $\mu=0.005\text{Pa}\cdot\text{s}$, 相对密度 $d=0.85$, 求该液体的运动粘度 ν 。

解: 该液体的密度

$$\rho = 0.85 \times 1000\text{kg/m}^3 = 850\text{kg/m}^3$$

该液体的运动粘度

$$\begin{aligned}\nu &= \mu/\rho = (0.005/850)(\text{m}^2/\text{s}) \\ &= 5.882\text{mm}^2/\text{s} = 5.882\text{cSt}\end{aligned}$$

[例 2-2] 设泵壳内油的容积为 $V=200\text{mL}$, 从几何尺寸上算得活塞行程所能排挤出的油的体积应为 $\Delta V_1=3.18\text{mL}$, 挤压前油的压强为 21MPa , 挤压终了时油的压强为 32MPa , 油的体积弹性系数 $K=2.1\times 10^3\text{MPa}$, 泵的外壳可以认为是刚性的。求仅考虑油液的压缩性而造成的泵的容积效率。

解: 设泵内油液压强由 21MPa 升到 32MPa 时, 油液体积被压缩了 ΔV 。

由体积模量定义式

$$\begin{aligned}K &= \frac{1}{\kappa} = -\frac{V\Delta P}{\Delta V} \\ \Delta V &= -\frac{V \cdot \Delta P}{K} = -\frac{200 \times (32-21)}{2.1 \times 10^3}(\text{mL}) \\ &= -1.0476\text{mL}\end{aligned}$$

式中负号表示容积被压缩。

实际上泵所能排挤出去的油液的体积

$$\begin{aligned}\Delta V_2 &= \Delta V_1 - \Delta V \\ &= 31.8\text{mL} - 1.0476\text{mL} = 30.7524\text{mL}\end{aligned}$$

由容积效率的定义

$$\eta_v = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \times 100\% = \frac{30.7524\text{mL}}{31.8\text{mL}} \times 100\% = 96.7\%$$

[例 2-3] 如图 2-2 所示, 在相距 $h=0.06\text{m}$ 的两个固定平行平板中间放置另一块薄板, 在薄板的上下分别放有不同粘度的油, 并且一种油的粘度是另一种油的粘度的 2 倍。当薄板以匀速 $v=0.3\text{m/s}$ 被拖动时, 每平方米受合力 $F=29\text{N}$, 求两种油的粘度各是多少?

解: 设薄板上层油的粘度为 μ , 则下层为 2μ , 并假定缝隙中的速度按线性分布, 薄板与流体接触的面积为 A 。

由牛顿内摩擦定律可知, 上部流体对板的阻碍力为

$$F_1 = \mu A \frac{dv}{dn}$$

其作用方向与合力 F 的方向相反。

下部流体对板的作用力为

$$F_2 = 2\mu A \frac{dv}{dn}$$

其作用方向仍与合力 F 的方向相反。

薄板匀速运动, 受力处于平衡状态, 必有

$$F = F_1 + F_2$$

即

$$\mu A \frac{dv}{dn} + 2\mu A \frac{dv}{dn} = F$$

或

$$\mu = \frac{F}{3A \frac{dv}{dn}}$$

式中

$$\frac{dv}{dn} = \frac{v}{h/2} = \frac{2v}{h}$$

代入上式得 $\mu = 0.97 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 这是薄板上层油的粘度。薄板下层油的粘度 $2\mu = 1.94 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

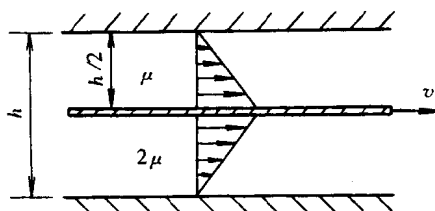


图 2-2

习 题

[2-1] 某种液体的密度 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$, 试求其重度 γ 和相对密度 d 。(答: $\gamma = 8829 \text{ N/m}^3$, $d = 0.9$)

[2-2] 已知由恩氏粘度计测得石油的粘度 $E = 5.6$, 如石油的密度 $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, 试求其动力粘度。(答: $\mu = 3.38 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

[2-3] 有一如图 2-3 所示的鉴定压力表的校正器, 器内充满油液, 油的体积压缩率 $\kappa = 4.75 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$, 用手轮旋转密封良好的活塞。已知活塞直径 $D = 10 \text{ mm}$, 旋进螺距 $t = 2 \text{ mm}$, 在压力为 0.1 MPa 时的油液体积为 $V_0 = 0.2 \text{ L}$, 问手轮应旋进多少圈才能造成 20 MPa 的油压。(答: $n = 12.1$ 圈)

[2-4] 如图 2-4 所示, 有一平板浮在液面上, 其水平方向运动速度为 $v = 1 \text{ m/s}$, 液层厚 $\delta = 10 \text{ mm}$, 液体的动力粘度 $\mu = 0.09807 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求平板单位面积所受的阻力。(答: $\tau = 9.807 \text{ Pa}$)

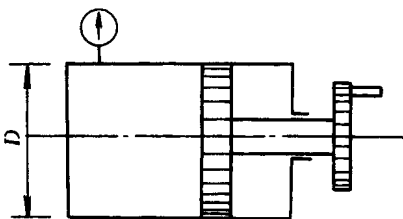


图 2-3

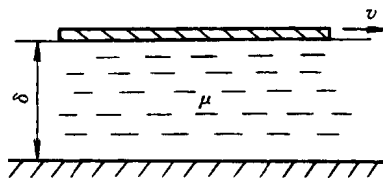


图 2-4

[2-5] 质量为 5 kg , 面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ 的一块平板, 沿着涂有润滑油的斜面等速向下运

动,如图 2-5 所示。已知 $v=1\text{m/s}$, $\delta=1\text{mm}$ 。求润滑油的动力粘度。(答: $\mu=0.1066\text{Pa}\cdot\text{s}$)

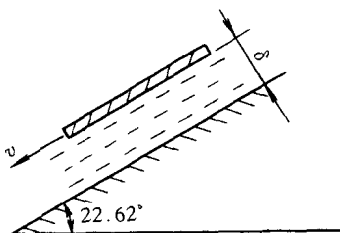


图 2-5

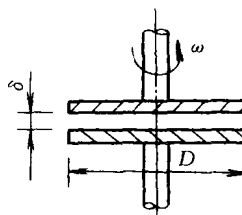


图 2-6

[2-6]如图 2-6 所示,有上下两块平行圆盘,直径均为 D 。在间距为 δ 的缝隙中充满动力粘度为 μ 的液体。若下盘固定不动,要想使上盘以等角速度 ω 旋转,问需施加多大的力矩 M 。(答: $M=\pi\mu\omega D^2/(32\delta)$)

[2-7]两种不相混合液体的交界面为 $A-A$ 。两种液体的动力粘度分别为 $\mu_1=0.14\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\mu_2=0.24\text{Pa}\cdot\text{s}$;两液层厚度分别为 $\delta_1=0.8\text{mm}$, $\delta_2=1.2\text{mm}$,如图 2-7 所示。假设两种液体中的速度分布均为直线规律,试求使底面积 $A=1000\text{cm}^2$ 的平板以 $v_0=0.4\text{m/s}$ 的匀速运动所需的力。(答: $F=3.73\text{N}$)

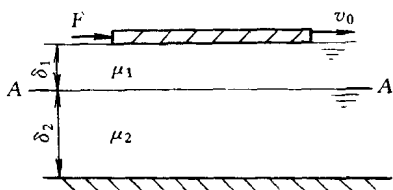


图 2-7

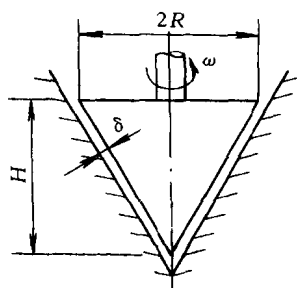


图 2-8

[2-8]如图 2-8 所示,有一圆锥体绕垂直中心轴等速旋转,锥体与固定的外锥面之间的缝隙 $\delta=1\text{mm}$,其中充满动力粘度 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油。已知锥体顶面半径 $R=0.3\text{m}$,锥体高度 $H=0.5\text{m}$,当旋转角速度 $\omega=16\text{rad/s}$ 时,求所需的旋转力矩 M 。(答: $M=39.6\text{N}\cdot\text{m}$)

第三章 流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下的力学规律。这里所说的静止,是指流体宏观质点之间没有相对运动,达到了相对的平衡。因此流体处于静止状态包括了两种形式:一种是流体对地球无相对运动,叫绝对静止。例如盛装在固定不动容器中的液体。另一种是流体整体对地球有相对运动,但流体对运动容器无相对运动,流体质点之间也无相对运动,这种静止叫相对静止。例如盛装在作等加速直线运动和作等角速度旋转运动的容器内的液体。

由于流体静止时,各质点之间无相对运动,流体的粘性表现不出来,流体静力学的一切原理,既适应于理想流体也适用于实际流体。

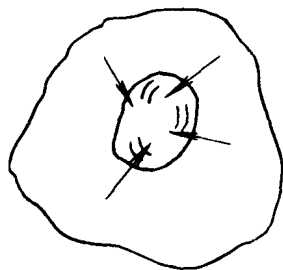
第一节 作用于静止流体上的力

一、质量力

质量力作用于流体的每一个流体质点上,其大小与流体所具有的质量成正比。例如,重力是一种质量力,惯性力也是一种质量力。在均质流体中,质量力与受作用流体的体积成正比,因此又叫体积力。

质量力的大小用单位质量力来度量。所谓单位质量力就是作用于单位质量流体上的质量力。

设均质流体的质量为 m , 体积为 V , 所受质量力为 F , 那么单位质量力为 F/m , 在数值上就等于加速度。若用 F_x, F_y, F_z 表示质量力 F 在三个坐标轴上的分力, f_x, f_y, f_z 分别表示单位质量力在坐标轴上的分量, 则 $f_x = F_x/m, f_y = F_y/m, f_z = F_z/m$, 在数值上也分别等于加速度在 x, y, z 轴上的分量。如果流体只受到地球引力的作用且取 z 轴铅垂向上, xOy 为水平面, 则单位质量力在 x, y, z 轴上的分量为 $f_x = 0, f_y = 0, f_z = -mg/m = -g$ 式中负号表示重力加速度 g 与坐标轴 z 正向相反。



二、表面力

我们在所研究的静止流体中划取一小块流体, 见图 3-1, 分析其上有何力的作用。为了保持它的受力平衡状态, 必须把四周其它流体对这一小块流体的作用力表现出来, 如图中箭头所示。这些力对整个流体而言是内力, 现在对这一小块划出来的流体而言就是外力, 这种外力就是小块流体所受的表面力。

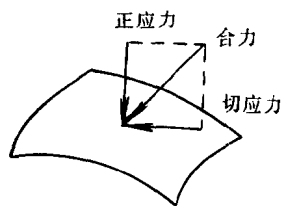


图 3-1

表面力是作用于被研究流体的外表面上, 其大小与表面积成正比。表面力按其作用方向可以分为两种: 一种是沿表面内法线方向的法向分力, 一种是沿表面切向的摩擦力。单位面积上的法向力称为流体的正应力, 单位面积上的切向力就是流体粘性引起的切应力。对于静止流体