

高等学校土木建筑专业
|应用型本科系列规划教材|

流体力学

方达宪 ◎ 主编

L I U T I L I X U E



东南大学出版社
Southeast University Press

高等学校土木建筑专业应用型本科系列规划教材

流 体 力 学

主 编 方达宪
副主编 王艳华 王 伟
参 编 金 贤 肖建强 朱文瑾

东南大学出版社
· 南京 ·

总前言

国家颁布的《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》指出,要“适应国家和区域经济社会发展需要,不断优化高等教育结构,重点扩大应用型、复合型、技能型人才培养规模”;“学生适应社会和就业创业能力不强,创新型、实用型、复合型人才紧缺”。为了更好地适应我国高等教育的改革和发展,满足高等学校对应用型人才的培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等的要求,东南大学出版社携手国内部分高等院校组建土木建筑专业应用型本科系列规划教材编审委员会。大家认为,目前适用于应用型人才培养的优秀教材还较少,大部分国家级教材对于培养应用型人才的院校来说起点偏高,难度偏大,内容偏多,且结合工程实践的内容往往偏少。因此,组织一批学术水平较高、实践能力较强、培养应用型人才的教学经验丰富的教师,编写出一套适用于应用型人才培养的教材是十分必要的,这将有力地促进应用型本科教学质量的提高。

经编审委员会商讨,对教材的编写达成如下共识:

一、体例要新颖活泼。学习和借鉴优秀教材特别是国外精品教材的写作思路、写作方法以及章节安排。摒弃传统工科教材知识点设置按部就班、理论讲解枯燥无味的弊端,以清新活泼的风格抓住学生的兴趣点,让教材为学生所用,使学生对教材不会产生畏难情绪。

二、人文知识与科技知识渗透。在教材编写中参考一些人文历史和科技知识,进行一些浅显易懂的类比,使教材更具可读性,改变工科教材艰深古板的面貌。

三、以学生为本。在教材编写过程中,“注重学思结合,注重知行统一,注重因材施教”,充分考虑大学生人才就业市场的发展变化,努力站在学生的角度思考问题,考虑学生对教材的感受,考虑学生的学习动力,力求做到教材贴合学生实际,受教师和学生欢迎。同时,考虑到学生考取相关资格证书的需要,教材中

还结合各类职业资格考试编写了相关习题。

四、理论讲解要简明扼要,文例突出应用。在编写过程中,紧扣“应用”两字创特色,紧紧围绕着应用型人才培养的主题,避免一些高深的理论及公式的推导,大力提倡白话文教材,文字表述清晰明了、一目了然,便于学生理解、接受,能激起学生的学习兴趣,提高学习效率。

五、突出先进性、现实性、实用性、操作性。对于知识更新较快的学科,力求将最新最前沿的知识写进教材,并且对未来发展趋势用阅读材料的方式介绍给学生。同时,努力将教学改革最新成果体现在教材中,以学生就业所需的专业知识和操作技能为着眼点,在适度的基础知识与理论体系覆盖下,着重讲解应用型人才培养所需的知识点和关键点,突出实用性和可操作性。

六、强化案例式教学。在编写过程中,有机融入最新的实例资料以及操作性较强的案例素材,并对这些素材资料进行有效的案例分析,提高教材的可读性和实用性,为教师案例教学提供便利。

七、重视实践环节。编写中力求优化知识结构,丰富社会实践,强化能力培养,着力提高学生的学习能力、实践能力、创新能力,注重实践操作的训练,通过实际训练加深对理论知识的理解。在实用性和技巧性强的章节中,设计相关的实践操作案例和练习题。

在教材编写过程中,由于编写者的水平和知识局限,难免存在缺陷与不足,恳请各位读者给予批评斧正,以便教材编审委员会重新审定,再版时进一步提升教材的质量。本套教材以“应用型”定位为出发点,适用于高等院校土木建筑、工程管理等相关专业,高校独立学院、民办院校以及成人教育和网络教育均可使用,也可作为相关专业人士的参考资料。

高等学校土木建筑专业应用型
本科系列规划教材编审委员会
2010年8月

前 言

为推动教材建设,满足高等学校对应用型人才培养模式、培养目标和课程体系等要求,由东南大学出版社组织编写了此教材。

本书根据教育部高等学校水力学及流体力学课程指导小组对土木类、环境类课程的基本要求,主要从流体力学课程的基础地位出发,考虑到与其他课程的联系,在编写时以土木工程为主,兼顾环境工程、建筑设备工程技术等专业的要求选择教材内容,并且覆盖了注册结构工程师流体力学考试大纲的全部内容。

根据土力学、基础工程等课程的要求,在渗流中增加了流网的相关知识;考虑建筑设备工程技术和环境工程专业的要求,适当增加了管网、水泵和一元气体流动的内容。因此,在选择本教材时,考虑到专业、各院校的定位、培养目标的差异和学时数的不同,各专业主讲教师在具体教学中可根据各院校的不同情况,对某些章节有所取舍。

本书共分为 10 章,主要内容包括流体静力学,流体动力学基础,能量损失,孔口、管嘴出流和有压管流,明渠流动,量纲分析和一元气体流动等。其中第 1 章、第 3 章由安徽新华学院方达宪、王艳华编写,第 2 章由金肯学院金贤编写,第 4 章、第 8 章由安徽新华学院王艳华编写,第 5 章、第 7 章和第 10 章由南京工程学院王伟编写,第 6 章由南京工程学院肖建强编写,第 9 章由淮海工学院朱文瑾编写。全书由王艳华统稿。

在本书编写过程中,浙江大学毛根海教授提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

由于时间紧迫,加之编者学识所限,尽管作了很大努力,但书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月

目 录

1 绪论	1
1.1 流体力学的任务和研究对象	1
1.2 流体力学发展简史及在相关工程中的应用	2
1.3 流体的主要物理力学性质	3
1.4 作用在流体上的力	11
1.5 流体的力学模型	12
1.6 牛顿流体和非牛顿流体	14
1.7 流体力学的研究方法、课程性质、目的和要求	14
2 流体静力学	18
2.1 静止流体中压强的特性	18
2.2 流体平衡微分方程	20
2.3 重力作用下流体静压强的分布规律	22
2.4 压强的测量	29
2.5 流体的相对平衡	30
2.6 液体作用在平面上的总压力	33
2.7 作用在曲面上的液体压力	38
3 流体运动理论与动力学基础	47
3.1 流体运动的描述方法	47
3.2 流场的基本概念	50
3.3 连续性方程	56
3.4 恒定总流的伯努利方程	60
3.5 恒定总流的动量方程	73
4 流动阻力与能量损失	82
4.1 流动阻力与水头损失的分类	82
4.2 均匀流沿程水头损失与切应力的关系	84
4.3 流体运动的两种流态	86
4.4 圆管层流运动	88
4.5 紊流运动的特征	91
4.6 紊流的沿程水头损失	95
4.7 局部水头损失	103
4.8 边界层与绕流阻力	108

5 孔口、管嘴出流和有压管流	113
5.1 孔口恒定出流	113
5.2 管嘴恒定出流	116
5.3 短管的水力计算	118
5.4 长管的水力计算	123
5.5 管网水力计算基础	128
5.6 有压管道中的水击	134
6 明渠流动	142
6.1 概述	142
6.2 明渠恒定均匀流	144
6.3 无压圆管均匀流	150
6.4 明渠恒定非均匀流	153
7 堰流	176
7.1 堰流的定义及分类	176
7.2 堰流的基本公式	177
7.3 薄壁堰	179
7.4 实用堰	181
7.5 宽顶堰	182
7.6 小桥孔径水力计算	185
8 渗流	191
8.1 概述	191
8.2 渗流基本定律	191
8.3 恒定无压渗流	195
8.4 井的渗流	198
8.5 渗流对建筑物安全稳定的影响	202
8.6 流网及其在渗流计算中的应用	204
9 量纲分析和相似原理	210
9.1 量纲	210
9.2 量纲分析法	213
9.3 相似理论基础	218
9.4 模型实验	223
10 可压缩气体的一元流动	228
10.1 可压缩气体的一些基本概念.....	228
10.2 理想气体一元恒定流动的基本原理.....	235
10.3 可压缩气体管道流动.....	240
参考文献	246

1 绪 论

1.1 流体力学的任务和研究对象

流体力学(fluid mechanics)是研究流体(fluid)的平衡和机械运动规律及应用这些规律来解决实际问题的实用技术科学,是应用力学的一个重要分支学科。流体力学研究的对象是流体,它包括液体和气体。

自然界的物质一般有三种存在形式:固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。宏观的看,固体具有一定的体积和形状,不易变形;液体有一定的体积,不易压缩,形状随容器形状而变,可有自由表面;气体容易压缩,充满整个容器,没有自由表面。从力学分析的意义上看,流体和固体的主要区别在于它们对外力的抵抗能力不同。固体由于其分子间距很小,内聚力很大,所以能保持固定的形状和体积,既能承受压力,也能承受拉力,抵抗拉伸变形;而流体由于分子间距离较大,内聚力小,只能承受压力,几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形;在任何微小切应力作用下,流体很容易发生变形和流动,如微风吹过平静的池水,水面因受气流的摩擦力作用而波动。

流体的基本特征是具有流动性。

当对流体施加剪切外力时,无论此外力如何之小,它总会发生变形,并且将不断地继续变形下去。这种不断继续变形的运动,称为流动。流体的这种在微小剪切力作用下,连续变形的特性,称为流动性。所以,流体就是在剪切外力作用下会发生流动的物体,它不能在承受剪力的同时,使自己保持静止状态。

流体力学研究的基本规律主要由两部分组成,即流体静力学和流体动力学。流体静力学是关于流体平衡的规律,它研究流体处于静止(或相对平衡)状态时,作用于流体上各种力之间的关系,如流体间的相互作用力、流体对固体表面的作用力等;流体动力学是关于流体运动的规律,它研究流体运动时,作用于流体上的力和运动之间的关系,即流体运动特性和能量转换等,如管流、明渠流动、堰流、孔口管嘴出流、渗流问题等。

流体力学所研究的问题,都属流体运动的范畴,客观外界存在的流体(特别是水),无论是自然界还是工程中,大多均处于运动状态。所以流体力学的大部分内容是讨论流体动力学问题。

流体力学在研究流体平衡和机械运动规律时,要应用物理学及理论力学中有关物体平衡和运动规律的原理,如力学平衡定理、动能定理、动量定理。因为流体在平衡和运动状态下同样要遵循自然界中这些普遍原理,所以说,物理学和理论力学的知识是学习流体力学的必要基础。

1.2 流体力学发展简史及在相关工程中的应用

1.2.1 流体力学的发展简史

流体力学的发展和其他学科一样,依赖于生产实践和科学实验,并受科学发展和社会因素的制约。人类在除水患和兴水利的长期实践中积累了许多有关水流运动规律的知识。

相传我国远古时期就有大禹治水,在秦代公元前 256~公元前 210 年兴建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程,其中郑国在陕西泾河上开凿的郑国渠,灌溉泾阳、三原等六县 20 余万亩农田;尤其是四川省灌县岷江上的都江堰,具有灌溉、分洪、航运的综合效益,并且通过都江堰工程所总结的“深淘滩、低作堰”,反映了当时人们对明渠水流和堰流有了一定的认识。

公元前 485 年开始修建,隋朝最后完成的从杭州到北京的大运河长达 1 782 km,大大改善了我国南北运输条件,特别是在运河上大量使用船闸,表明了我国劳动人民的高度智慧。

公元 1363 年制造的铜壶滴漏,是利用孔口出流使容器水位变化来计时的工具(即水位随时间变化的规律而制成的)。此外,我国人民很早就有利用水流的冲力带动水碓、水磨和水排等水力机械为生活、生产服务。

世界公认最早的水力学理论是公元前 250 年左右在希腊的阿基米德(Archimedes)论述的液体浮力和浮体的定律,奠定了流体静力学的基础。

16 世纪以后,欧洲的封建社会制度逐渐瓦解,资本主义处于上升阶段,工农业生产有了很大的发展,对于流体平衡与运动规律的认识才随之有所提高。如 1650 年帕斯卡(B. Pascal)发现的液体压强传递规律,1686 年牛顿(I. Newton)所建立的牛顿内摩擦定律等。但总体来说,还没有形成流体运动的系统理论。

公元 18 世纪之后,流体力学得到了较快的发展,流体运动的规律沿着两条途径建立了流体运动的系统理论。

其一,用数学分析的方法进行比较严格的推导,建立流体运动的基本方程,包括伯努利方程、欧拉方程等,但是由于这些纯理论的推导所作的某些假定(如忽略了流体的黏性),计算结果与实验不尽符合。

其二,从大量实验和实际观测资料,并根据简化后的一维方程数学分析,建立各运动要素之间的定量关系。

如 1732 年皮托(H. Pitot)发明了量测流速的皮托管;

1769 年谢才(A. Chézy)建立了计算均匀流动的谢才公式;

1856 年达西(H. Darcy)揭示了线性渗流的达西定律。

从 19 世纪末起,理论分析方法和实验分析方法相结合,形成了理论和实践并重的现代流体力学。20 世纪 60 年代以后,由于计算机的发展和普及,流体力学的应用更是日益广泛。

1821—1845 年,纳维叶(C. L. M. H. Navier)和斯托克斯(G. G. Stokes)等人成功地修正了理想流体的运动方程,添加了黏性项,使之成为适用于实际流体(黏性流体)运动的纳维叶-斯托克斯方程。

1883 年雷诺(O. Reynolds)发展了关于层流、紊流两种流态的系列试验结果,提出了动

力相似体,后又于 1895 年导出了紊流运动的雷诺方程。

1904 年法国人普朗特(L. Prandtl)提出了边界层概念,创立了边界层理论。

20 世纪以来,随着航空技术的发展,以及大型水利工程、环境工程的需要,流体力学得到了空前的发展。近年来,由于科学技术的飞速发展,流体力学与其他学科相互渗透,形成了一系列边缘学科。航空和航天技术飞速发展带来了高速空气动力学的辉煌成就;而近期生物工程和生命科学的崛起,又正孕育和推动着生物流体动力学的突飞猛进。此外,海洋、环境、能源等新兴科学领域也都不断地向流体力学提出了新的研究任务。

1.2.2 流体力学在土木工程中的应用

流体力学在许多工业部门中都有着广泛的应用,在航空工业、造船工业、电力工业、机械工业、化学工业、水利工程、交通运输等都遇到不少流体力学问题,所以说流体力学在所有的工业部门中都有着广泛的应用。

在我们的日常生活和工农业生产部门,都离不开水,在许多与水有关的工程中,几乎都存在着构筑物存水、管渠的输水问题。例如城市的生活用水和工业用水、水力发电、农田灌溉、航运交通、土木建筑、环境保护、供热通风、石油化工、采矿冶金、动力机械等等都要碰到大量与流体运动规律有关的问题,而要解决这些问题又必须具备流体力学知识。

譬如进水管路的布置,水管直径和水塔高度的设计,水泵的容量和井的产水量的计算,桥涵孔径的设计,站场路基排水的设计,隧洞的通水和排水的设计等。

如果不具备流体力学知识,就无法进行这方面的设计和计算,若没有真正掌握流体力学知识,那么在选择构筑物的形式或对构筑物的设计会不恰当,不是造成工程投资和管理费用的增大,就是达不到供需要求,甚至造成构筑物的破坏。

流体力学广泛应用于土木工程的各个领域。

(1) 在建筑工程中的应用。如解决风对高耸建筑物的荷载作用和风振问题、基坑排水、地下水渗透、水下与地下建筑物的受力分析、围堰修建、海洋平台在水中的受力和抵抗外界扰动的稳定性等。

(2) 在市政工程中的应用。如桥涵孔径设计、积水排水、管网计算、泵站和水塔的设计等。特别是在给水排水工程中,取水、水处理、输配水等更是离不开流体力学的知识。

(3) 在城市防洪工程中的应用。如河道的过流能力,堤、坝的作用力与渗流问题,防洪闸堤的过流能力等。

(4) 在建筑环境与设备工程中的应用。如供热、通风与空调设计和设备选用等。

(5) 在水利工程中的应用。水利工程对流体力学的需求更广、更深,仅有本课程这一门大土木公共专业基础课是不够的,还必须学习工程水力学课程,以满足专业的要求。

事实上,目前很难找到与流体力学无关的专业和学科。流体力学已广泛应用于各个领域。

1.3 流体的主要物理力学性质

研究流体机械运动的规律,当然离不开外力的作用,更应了解流体的物理力学性质,外是通过内因起作用的。因此,下面首先介绍一下和机械运动有关的流体的主要物理力学

性质。

1.3.1 惯性

任何物质都有惯性,惯性是物体保持原有状态的特性。物体运动状态的任何改变,都必须克服惯性作用。质量是惯性大小的度量,质量越大,惯性越大。当流体受到外力作用使运动状态发生改变时,流体就要产生反抗其改变的反作用力,即惯性力。

设物体的质量为 m , 加速度为 a , 则惯性力为

$$F = -ma \tag{1-1}$$

单位体积的质量称为密度,以 ρ 表示,单位 kg/m^3 。

若某一质量为 m , 其体积为 V 的均质流体,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-2}$$

对于非均质流体,各点的 ρ 不同,要确定空间某点流体的 ρ , 可在包含该点的周围取一微元体积 ΔV , 若它的质量为 Δm , 则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{1-3}$$

流体的密度随温度和压强的变化而变化,在一个标准大气压下,不同温度下水和空气的密度可见表 1-1。

表 1-1 在一个标准大气压时不同温度下水和空气的密度 (kg/m³)

温度(℃)	水	空气	温度(℃)	水	空气
0	999.9	1.293	40	992.2	1.128
5	1000	1.270	50	988.1	1.093
10	999.7	1.248	60	983.2	1.06
15	999.1	1.226	70	977.8	1.029
20	998.2	1.205	80	971.8	1
25	997.1	1.185	90	965.3	0.973
30	995.7	1.165	100	958.4	0.947

液体的密度随温度和压强的变化很小,在绝大多数实际工程流体力学问题中均视为常数,计算时一般采用 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{水}} = 13600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。气体的密度随温度和压强的变化而变化,一个标准大气压条件下,0℃ 空气的密度为 $\rho_{\text{空气}} = 1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

1.3.2 万有引力特性

任何物体之间都具有互相吸引的性质,其吸引力称为万有引力。

在流体运动中,一般只需考虑地球对流体的引力,这个引力就是重力,重力的大小称为重量,用符号 G 来表示。在研究流体所受的作用力时,重力常是一个很重要的力。重量的单位是 N 或 kN , $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。重量 G 与质量 m 、重力加速度 g 的关系是

$$G = mg \tag{1-4}$$

1.3.3 黏性

黏性是流体固有的物理属性。

前面已经提到,与固体不同,流体具有流动性,静止时不能承受任何微小的切应力及抵抗剪切变形。但当流体处在运动状态时,若流体质点之间存在着相对运动,则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动,这种性质称为黏性(也称黏滞性)。也就是说,流体内部质点或流层间因相对运动而产生内摩擦力以抵抗剪切变形,这种性质称为黏性,此内摩擦力称为黏滞力。

1) 黏性表象

为了解流体的黏性,如图 1-1,水沿固定平面壁做平面直线运动,紧靠固体壁面的第一层水层黏在壁面上不动,第一层通过摩擦作用影响第二层的流速,第二层又通过摩擦(黏性力)作用影响第三层流速,依此类推。

从图 1-1 中可看出,离开壁面的距离越大,壁面对流速的影响越小,于是近壁面的流速小、而远离壁面的流速大。若固体边界 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y + dy$ 处的流速应为 $u + du$ 。

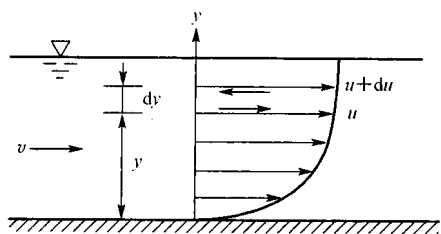


图 1-1 黏性表象

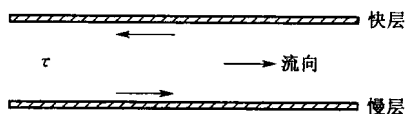


图 1-2 流动流体的内摩擦力

由于各流层的 u 不同,它们之间就有相对运动,上层流得快,它就要拖动下一层,而下一层流得较慢,就要阻止上面一层,于是两层之间就产生内摩擦力,如图 1-2 所示。快层对慢层的内摩擦力要使慢层快一些,而慢层对快层的内摩擦力要使快层慢一些,这就是黏性的表象。因此黏性就是流体的内摩擦特性。

应该指出,黏性对流体运动的影响极为重要。由于运动流体内部存在内摩擦力,于是流体在运动过程中为克服内摩擦力就要不断消耗能量,所以说黏性是引起流体能量损失的根源,因此在分析和研究流体运动中流体的黏性占有很重要的地位。

2) 牛顿内摩擦定律

1687 年,牛顿(Newton, I. 1642—1727)在其所著的《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 T 与流体的性质有关,与速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比,与流层的接触面积 A 成正比,与接触面上的压力无关,即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

以应力表示为

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

式(1-5)、式(1-6)称为牛顿内摩擦定律。

式中流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 为速度在流层法线方向的变化率。为进一步说明其物理意义,在距离为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团,这里的微团即质点,只是在考虑尺度效应(旋转、变形)时,习惯称为微团。如图 1-3 所示。

因微团上、下层的速度相差 du ,经时间 dt ,微团除位移外,还有剪切变形 $d\gamma$ 。由于 dt 很小, $d\gamma$ 也很小,所以有

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du dt}{dy} \quad (1-7)$$

因此,牛顿内摩擦定律又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-8)$$

比例系数 μ 称为动力黏性系数,简称黏度,单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或帕斯卡·秒($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。动力黏性系数是流体黏性大小的度量, μ 值越大,流体越黏,流动性越差。

3) 流体的黏度

流体的性质对摩擦力的影响是通过动力黏度 μ 来反映的,黏性大的流体 μ 大,黏性小的流体 μ 小。

流体的黏度随流体种类的不同而不同,一般在相同条件下液体的黏度要大于气体黏度,并随温度和压强的变化而变化。但随压强变化甚小,通常可以忽略,而对温度变化较为敏感。并且对于液体和气体的黏度随温度变化规律是不同的,其中液体的 μ 值随温度的升高而减小,则气体 μ 值随温度升高而增大。这是由于液体分子间距较小,相互吸引力及内聚力较大,内聚力是产生黏度的主要原因。随着温度升高,分子间距增大,内聚力减小,从而使液体黏度减小。气体分子间距大,内聚力很小,黏度主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时,气体分子运动加快,分子的动量交换速率加剧,切应力随之增加,黏度增加。

在分析黏性流体的运动规律时,会经常同时出现 μ 和 ρ 的比值,因此在实际计算中,人们常用运动黏度 ν 来表示,运动黏度系数的单位用 m^2/s 或斯托克斯(St)表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

在实际计算中,可查阅有关手册中各种流体的黏温曲线,或用经验公式计算。水和空气在常压下不同温度时的黏度见表 1-2 和表 1-3。

对于水, ν 可按下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-10)$$

式中： t ——水温(℃)。

表 1-2 水的黏度

$T(^{\circ}\text{C})$	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	$T(^{\circ}\text{C})$	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1-3 一个大气压下空气的黏度

$T(^{\circ}\text{C})$	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	$T(^{\circ}\text{C})$	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	0.017 2	13.7	90	0.021 6	22.9
10	0.017 8	14.7	100	0.021 8	23.6
20	0.018 3	15.7	120	0.022 8	26.2
30	0.018 7	16.6	140	0.023 6	28.5
40	0.019 2	17.6	160	0.024 2	30.6
50	0.019 6	18.6	180	0.025 1	33.2
60	0.020 1	19.6	200	0.025 9	35.8
70	0.020 4	20.5	250	0.028 0	42.8
80	0.021 0	21.7	300	0.029 8	49.9

【例 1-1】 一平板在油面上做水平运动(如图 1-4 所示),已知平板的速度为 $u = 400\text{ mm/s}$,油层的厚度 $\delta = 0.5\text{ mm}$,油的动力黏度 $\mu = 0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$,求作用在平板单位面积上的黏性阻力。

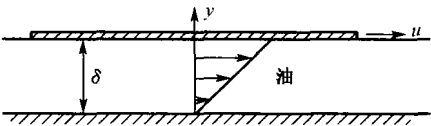


图 1-4 平面间液体的流速分布

【解】 由题意可知:

直接与平板接触的油层附在平板上,随平板一起运动,与之相邻的下面油层,作用在该层上的切应力(方向与平板运动方向相反)等于作用在平板单位面积上的黏性阻力。

由牛顿内摩擦定律,可知 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 。若油层内流速按直线分布(δ 很小,可近似为直线分布), $\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta}$,故

$$\tau = \mu \frac{u}{\delta} = \frac{0.1\text{ Pa}\cdot\text{s} \times 400\text{ mm/s}}{0.5\text{ mm}} = 80\text{ N/m}^2$$

【例 1-2】 旋转圆筒黏度计,外筒固定,内筒由同步电机带动旋转。内外筒间充入实验

液体(图 1-5)。已知内筒半径 $r_1 = 19.3 \text{ mm}$, 外筒半径 $r_2 = 20 \text{ mm}$, 内筒高 $h = 70 \text{ mm}$ 。实验测得内筒转速 $n = 10 \text{ r/min}$, 转轴上扭矩 $M = 0.0045 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试求该实验液体的黏度。

【解】 充入内外筒间隙的实验液体, 在内筒带动下做圆周运动。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

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

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

$$\text{扭矩} \quad M = \tau A r_1 = \tau \times 2\pi r_1 h \times r_1$$

解得

$$\mu = \frac{15M\delta}{\pi^2 r_1^3 h n} = \frac{15 \times 0.0045 \text{ N} \cdot \text{m} \times (20 \times 10^{-3} \text{ m} - 19.3 \times 10^{-3} \text{ m})}{3.14^2 \times (19.3 \times 10^{-3} \text{ m})^3 \times 70 \times 10^{-3} \text{ m} \times 10 \text{ r/min}} = 0.952 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

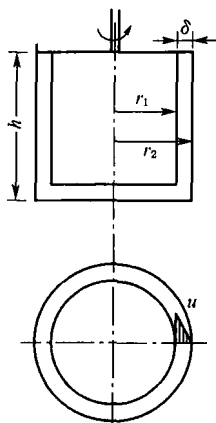


图 1-5 旋转黏度计

1.3.4 压缩性与膨胀性

流体不能承受拉力, 但可承受压力, 在密闭容器内流体表面上用活塞加压, 流体就受到压力, 受压后的流体体积 V 要缩小, 密度 ρ 要加大, 除去外力后能恢复原状。即流体的压缩性是流体受压, 体积缩小, 密度增大, 除去外力后能恢复原状的性质。而流体的膨胀性是指流体受热, 体积膨胀, 密度减小, 温度下降后能恢复原状的性质。

液体和气体虽属流体, 但其压缩性和膨胀性大不一样, 下面分别说明。

1) 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性用压缩系数来表示, 它表示在一定的温度下, 压强增大 1 个单位, 体积的相对缩小率。某液体在承受压强为 p 的情况下, 其体积为 V , 当压强增加 dp 后, 体积将缩小 dV , 压缩系数为

$$\kappa = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dp}{p}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-11)$$

κ 的单位是压强单位的倒数, 即 Pa^{-1} , 式中的负值考虑液体受压 p 增大, V 减小, 其值为负值, 为使 κ 为正值, 故取负号。

根据液体压缩前后质量不变

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

得

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

所以, 压缩系数 κ 可表示为

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-12)$$

压缩系数的倒数是体积弹性模量, 用 K 表示, 即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-13)$$

K 值越大,表示液体越不容易压缩, $K \rightarrow \infty$ 表示绝对不可压缩。 K 的单位是 Pa。

液体的压缩系数随温度和压强变化,水的压缩系数见表 1-4,表中压强单位为工程大气压, $1 \text{ at} = 98\,000 \text{ N/m}^2$ 。

表 1-4 水的压缩系数 $\kappa (\times 10^{-9} / \text{Pa})$

压强(at) 温度(℃)	5	10	20	40	80
0	0.540	0.537	0.531	0.523	0.515
10	0.523	0.518	0.507	0.497	0.492
20	0.515	0.505	0.495	0.480	0.460

液体的膨胀性用体积膨胀系数 α_v 来表示,它表示一定的压强下,温度增加 1°C ,体积的相对变化率。若液体的原体积为 V ,温度升高 dT 后,体积增加 dV ,其体积膨胀系数为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-14)$$

α_v 越大,液体越容易膨胀, α_v 的单位为 K^{-1} 或 $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

液体的膨胀系数随压强和温度变化,水的膨胀系数见表 1-5。

表 1-5 水的膨胀系数 $\alpha_v (\times 10^{-4} / ^\circ\text{C})$

温度(℃) 压强(at)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
1	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
100	0.43	1.65	4.22	5.48	7.04
200	0.72	1.83	4.26	5.39	

从表 1-4 和表 1-5 中可以看出,水的压缩性和膨胀性都很小,压强每升高一个大气压,水的密度约增加 $1/20\,000$;在常温($10 \sim 20^\circ\text{C}$)情况下,温度每增加 1°C ,水的密度约减少 $1.5/10\,000$ 。

所以在一般情况下,水的压缩性和膨胀性可忽略不计,只有在某些特殊情况下,如水管阀门突然关闭时所发生的水击现象、自然循环的热水采暖系统等问题时,才需考虑水的压缩性和膨胀性。

2) 气体的压缩性和膨胀性

气体和液体不同,具有比较显著的压缩性和膨胀性,气体的密度随压强和温度发生显著的变化,在一般常温常压下,常用气体(如空气、氮、氧、二氧化碳)的密度 ρ 、 T 、 p 三者之间的关系,相当于符合理想气体状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-15)$$

式中： p ——气体的绝对压强(N/m²)；

ρ ——密度(kg/m³)；

T ——热力学温度(K)；

R ——气体常数，在标准状态下， $R = \frac{8314}{M} \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ， M 为气体的分子量。空气的气体常数 $R = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

最后应指出，当气体处于很高的压强，很低的温度，或接近于液体时，就不能当作理想气体看待，式(1-15)就不适用了。

【例 1-3】 20℃ 体积为 2.5 m³ 的水，当温度升到 80℃ 时，其体积增加多少？

【解】 20℃ 时水的密度为 $\rho_1 = 998.23 \text{ kg/m}^3$ ，80℃ 时密度为 $\rho_2 = 971.83 \text{ kg/m}^3$ ，因质量守恒，所以温度升高时体积会随密度降低而增加，即有

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

代入数据

$$\begin{aligned}\Delta V &= -\frac{\Delta\rho}{\rho}V = -\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}V_1 \\ &= -\frac{971.83 \text{ kg/m}^3 - 998.23 \text{ kg/m}^3}{998.23 \text{ kg/m}^3} \times 2.5 \text{ m}^3 = 0.0661 \text{ m}^3\end{aligned}$$

$$\text{则} \quad \frac{\Delta V}{V_1} = \frac{0.0661 \text{ m}^3}{2.5 \text{ m}^3} \times 100\% = 2.64\%$$

体积增加了 2.64%。

【例 1-4】 若要使水的体积减小 0.1%、1%，则应使压强分别增加多少？（已知水的体积弹性模量 $K = 2000 \text{ MPa}$ ）

$$\text{【解】 由式(1-14)可知} \quad \Delta p = -K \frac{\Delta V}{V_1}$$

$$\text{当 } \Delta V/V_1 = -0.1\% \text{ 时} \quad \Delta p = -2000 \text{ MPa} \times (-0.1\%) = 2.0 \text{ MPa}$$

$$\text{当 } \Delta V/V_1 = -1\% \text{ 时} \quad \Delta p = -2000 \text{ MPa} \times (-1\%) = 20.0 \text{ MPa}$$

所以，要使水的体积减小 0.1%、1%，则应使压强分别增加 2.0 MPa 和 20.0 MPa。

1.3.5 表面张力特性

1) 液体的表面张力

在我们的日常生活中，雨后水滴在枝头悬而不滴落、水面稍高出碗口而不外溢等现象，这就是流体力学中所说的表面张力起了作用。那么什么是表面张力呢？

自由表面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡，使自由面上液体分子受有极其微小的拉力，这种拉力称为表面张力。表面张力仅在自由表面存在，而在液体内部并不存在，即它是一种局部的受力现象。

表面张力的大小是用表面张力系数 σ 来衡量的。 σ 是指在自由表面上单位长度所受拉