

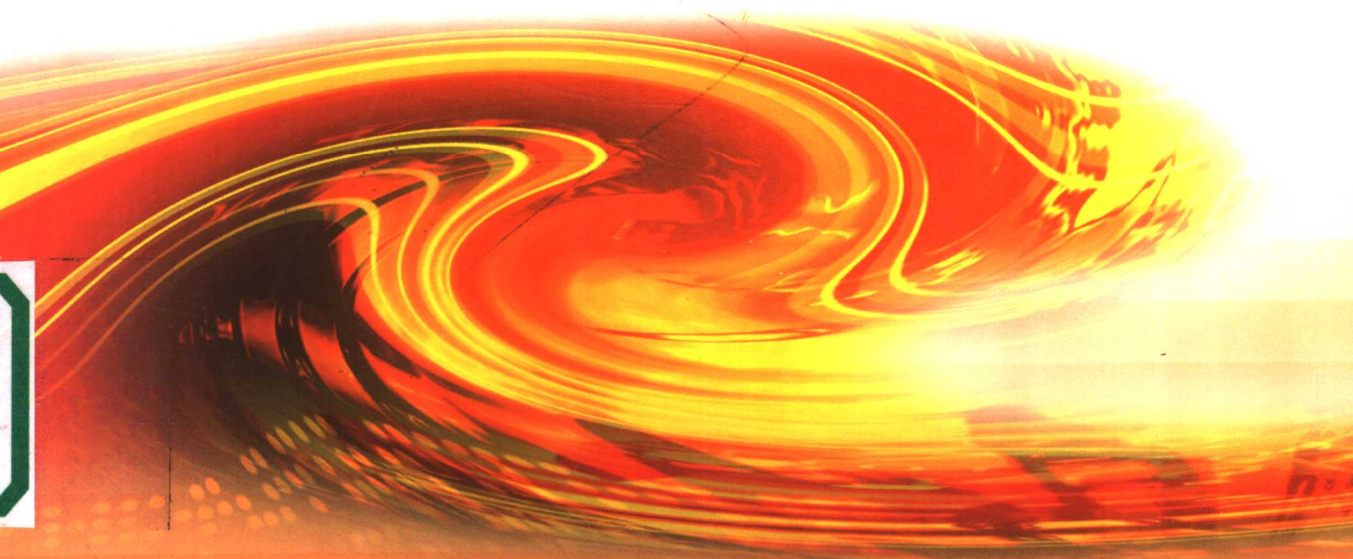


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

工程流体力学

杨树人 汪志明 何光渝 崔海清 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

工程流体力学

杨树人 汪志明 何光渝 崔海清 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书根据石油工程、油气储运工程和石油机械工程等专业对流体力学的需要而编写的,结合流体力学学科和相关专业的特点,从解决油田生产实际中所涉及的流体力学问题出发,着重讲述流体力学的基本理论及其工程应用。全书包括绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学、量纲分析与相似原理、粘性流体动力学基础、压力管路、理想不可压缩流体平面流动和气体动力学基础等九章。

本书可作为石油高校石油工程、油气储运工程和石油机械工程等专业的工程流体力学教材,也可作为石油工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/杨树人等主编.

北京:石油工业出版社,2006.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 7-5021-5477-9

I. 工…

II. 杨…

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(2006)第 027633 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技排版中心

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.25

字数:382 千字 印数:1—3000 册

定价:22.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

本教材是根据石油高校流体力学学科教学指导委员会于 1993 年所制订的《工程流体力学》教学大纲编写的,适用于石油工程、油气储运工程、石油机械工程等专业。本教材结合流体力学学科和相关专业的特点,从解决油田生产实际中所涉及的流体力学问题出发,讲述流体力学的基本理论和基本方法,以提高学生分析问题和解决问题的能力。为了便于学生更好地掌握本教材的内容,每章后都附有思考题和习题。各院校在使用时可根据需要选择讲授,这些章节在书中标有 * 号。

全书包括绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学、量纲分析与相似原理、粘性流体动力学基础、压力管路、理想不可压缩流体平面流动和气体动力学基础等九章。具体分工为:杨树人编写第一章、第九章及附录;汪志明编写第二章;何光渝编写第三章;崔海清编写第四章;韩洪升编写第五章;刘银庆编写第六章;国丽萍编写第七章;王春生编写第八章。

在本教材编写过程中,参考了陈家琅主编的《水力学》、崔海清主编的《工程流体力学》、袁恩熙主编的《工程流体力学》、贺礼清主编的《工程流体力学》和潘锦珊主编的《气体动力学基础》等教材,这些教材对本书的编写提供了非常丰富的素材。另外,大庆石油学院流体力学教研室研究生刘丽丽和吴楠在教材的编写工作中也给予了热心的帮助,在此一并表示感谢。

全书由杨树人、汪志明、何光渝、崔海清主编。

由于编者的水平有限,加之时间仓促,本书在内容选择和编写上难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2006 年 3 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 工程流体力学及其在石油工业中的作用	(1)
第二节 流体的基本概念	(3)
第三节 流体的主要力学性质	(3)
第四节 作用在流体上的力	(10)
思考题	(11)
习题	(12)
第二章 流体静力学	(13)
第一节 流体静压力及其特性	(13)
第二节 流体平衡方程	(15)
第三节 流体静力学基本公式及其应用	(18)
第四节 几种质量力作用下的流体平衡	(21)
第五节 静止流体作用在平面上的总压力	(24)
第六节 静止流体作用在曲面上的总压力	(28)
第七节 物体在液体中的潜浮原理*	(32)
思考题	(33)
习题	(34)
第三章 流体运动学	(37)
第一节 描述流动的两种方法	(37)
第二节 流动的分类	(40)
第三节 流体运动学的基本概念	(42)
第四节 连续性方程	(48)
第五节 流体微团运动分析	(51)
思考题	(58)
习题	(58)
第四章 流体动力学	(60)
第一节 理想流体运动微分方程	(60)
第二节 实际流体总流的伯努利方程	(63)
第三节 泵对液流能量的增加	(73)
第四节 动量方程及其应用	(75)
第五节 动量矩方程及其应用	(80)
思考题	(83)
习题	(83)

第五章 量纲分析与相似原理	(88)
第一节 量纲分析	(88)
第二节 相似原理	(94)
第三节 模型实验	(97)
思考题	(99)
习题	(99)
第六章 粘性流体动力学基础	(100)
第一节 管路中流动阻力的成因及分类	(100)
第二节 两种流动状态及判别标准	(102)
第三节 粘性流体的运动方程	(105)
第四节 圆管中的层流流动	(109)
第五节 紊流的理论分析	(112)
第六节 圆管紊流的沿程水头损失	(118)
第七节 局部水头损失	(121)
第八节 附面层理论初步*	(125)
思考题	(134)
习题	(134)
第七章 压力管路 孔口和管嘴出流	(138)
第一节 简单长管的水力计算	(138)
第二节 复杂管路的水力计算	(143)
第三节 短管的水力计算	(147)
第四节 水击现象	(150)
第五节 孔口和管嘴的水力计算	(154)
思考题	(160)
习题	(160)
第八章 理想不可压缩流体平面流动	(163)
第一节 无旋流动和有旋流动	(163)
第二节 平面势流	(166)
第三节 势流的叠加原理	(173)
第四节 平行流绕圆柱体无环流流动	(177)
第五节 平行流绕圆柱体有环流流动	(180)
第六节 粘性流体绕流圆柱体的分析*	(183)
思考题	(184)
习题	(185)
第九章 气体动力学基础	(186)
第一节 一元稳定可压缩流动的基本方程	(186)
第二节 声速和马赫数	(191)
第三节 气流参数	(193)

第四节	气体动力学函数及其应用	(197)
第五节	弱扰动在气流中的传播	(203)
第六节	气流中的压力波简介*	(204)
第七节	变截面管流	(206)
第八节	等截面摩擦管流	(212)
第九节	等截面换热管流	(215)
思考题		(217)
习题		(217)
附录		(219)
附录 A	矢量分析	(219)
附录 B	场论初步	(221)
附录 C	气动函数表	(224)
参考文献		(233)

第一章 绪 论

第一节 工程流体力学及其在石油工业中的作用

一、工程流体力学的研究内容和研究方法

工程流体力学是力学的一个分支,它主要研究流体在静止和运动时所遵循的基本规律,以及流体与固体间的相互作用,用以解决工程实际问题。工程流体力学的研究内容包含流体静力学、流体运动学和流体动力学三部分。

同物理学等其他的自然科学科的研究方法一样,流体力学的研究方法包括理论方法和实验方法。理论方法就是根据物理模型和物理定律建立描写流体运动规律的封闭方程组以及相应的初始条件和边界条件,运用数学方法准确或近似地求解流场,揭示流动规律;实验方法就是运用模型实验理论,设计实验装置直接观测流动现象,测量流体的流动参数并加以分析和处理,然后从中得到流动规律。

在流体力学学科体系中,根据研究方法的不同,流体力学可分为理论流体力学、工程流体力学和水力学三个分支。理论流体力学侧重于运用数学方法进行理论研究,水力学侧重于运用物理和实验方法进行实用研究,而工程流体力学则趋向于前面两种方法的结合,对工程实际涉及的流体力学问题进行研究。

二、流体力学的发展简史

自古以来,人类逐水草而居,为了生存,兴水利,除水害,古时就有大禹治水疏通江河的传说;秦代李冰父子带领劳动人民修建的都江堰工程具有相当高的科学水平,至今还在发挥着作用;古罗马人大约与此同时建成了大规模的供水管道系统等等。流体力学就是人类在认识自然和改造自然的实践中逐步发展起来的。

对流体力学学科的形成做出第一个贡献的是古希腊的阿基米德,他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。在此之后的千余年间,流体力学没有重大发展,直到15世纪,意大利达·芬奇的著作才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题。

17世纪,帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对粘性流体运动时的内摩擦力建立了牛顿粘性定律。之后,法国皮托发明了测量流速的皮托管;达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,

运用微分方程组描述无粘流体的运动;伯努利从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得到了流体定常流动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志,从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的新阶段。

从18世纪起,势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国拉格朗日对无旋运动,德国赫尔姆霍兹对于涡旋运动作了比较深入的研究和探索,进一步推动了流体力学的发展。

19世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其是要解决带有粘性影响的问题部分地运用流体力学,部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究,这就形成了水力学,至今它仍与理论流体力学并行地发展。1822年,纳维建立了粘性流体的基本运动方程;1845年,斯托克斯又在更合理的基础上导出了这个方程,并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维—斯托克斯方程(简称N—S方程),它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是N—S方程在粘度为零时的特例。

20世纪初,普朗特学派从1904年到1921年逐步将N—S方程作了简化,建立了边界层理论,能实际计算简单情形下,边界层内流动状态和流体同固体间的粘性力。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。使上述两种情况得到了统一。

飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。航空事业的发展,期望能够揭示飞行器周围的压力分布、飞行器的受力状况,升力和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面的发展。以儒科夫斯基、恰普雷金等为代表的科学家,开创了以无粘不可压缩流体势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼怎样获得升力,从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识无粘流体理论的重要性,肯定了它指导工程设计的重大意义。机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的又一重大进展,它使无粘流体理论同粘性流体的边界层理论很好地结合起来。

20世纪40年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,使气体高速流动的研究进展迅速,形成了气体动力学和稀薄空气动力学;流体力学和其他学科的互相交叉渗透,形成多相流体力学、物理—化学流体动力学、磁流体力学、生物流体力学等;随着计算机技术和计算方法的飞速发展,使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性,计算流体力学也应运而生,已经成为复杂边界条件下流动问题的求解工具。

三、工程流体力学在石油工业中的作用

钻井用的钻井液和水泥浆的循环,油田生产作业用的压裂液和驱替液的注入,原油、天然气的储运,油井中油气的采出、地面上的分离和集输,成品油的加工过程中经常涉及流体力学的许多方面,例如钻井液循环压力和流速的设计,套管强度的校核,采油过程中油井采出的流体在泵或井筒内的流动规律分析,地面管线的布设,管径设计,管线强度的校核,压差与流量之间关系的确定,输液泵的选择和安装位置的确定,储油罐强度的校核,油品装卸时间的计算,油品和天然气的计量,气蚀和水击等现象的预防等等。解决所有这些问题,都要求从事石油工程技术的科学工作者必须具备工程流体力学知识,以便在石油工程的建设和管理中更好地发挥作用。

第二节 流体的基本概念

一、流体的概念

流体指可以流动的物质,包括气体和液体。与固体相比,流体分子间的引力较小,分子运动剧烈,分子排列松散,这就决定了流体不能保持一定的形状,具有较大的流动性。

在一定的剪切力的作用下,刚体不产生任何变形;弹性体的变形与作用力的大小成正比,并且在作用力消失后能够恢复原来的形状;塑性体与弹性体类似,只是在作用力消失后只能部分地恢复原来的形状。而流体则不同,无论在多么小的剪切力的作用下其变形都将持续下去,直至剪切力消失。流体的这种持续的剪切变形称为流动。因此,流体与固体最显著的差别就是具有流动性。

气体和液体都属于流体,除了都具有流动性之外,还有以下两点差别:首先是气体具有很大的压缩性,而液体的压缩性非常小;其次是容器内的气体将充满整个容器,而液体则有可能存在自由液面。

二、连续介质假设

大家知道,任何实际的流体都是由大量微小的分子构成的,而且每个分子都在不断地作无规则的热运动。但是,流体力学的任务是研究流体的宏观运动规律。所以,在流体力学领域里,一般不考虑流体的微观结构,而是采用一种简化的模型来代替流体的真实微观结构。按照这种假设,流体充满着一个空间时是不留任何空隙的,即把流体看作是连续介质。

由连续介质假设所带来的最大简化是:我们不必研究大量分子的瞬间运动状态,而只要研究描述流体宏观状态物理量,如密度、速度、压力等就行了。在连续介质中,可以把这些物理量看作是空间坐标和时间的连续函数。因而在处理流体力学问题时,有了连续介质假设,就可以把一个本来是大量的离散分子或原子的运动问题近似为连续充满整个空间的流体质点的运动问题。而且每个空间点和每个时刻都有确定的物理量,它们都是空间坐标和时间的连续函数,从而可以利用数学分析中连续函数的理论分析流体的流动。这一假设在绝大多数情况下都是适用的,只有对稀薄气体,这一假设不再适用,而必须看作是不连续的介质。

对许多的初学者来讲,流体质点和流体微团这两个概念是很容易混淆的。流体质点是指微观上充分大,宏观上充分小,不具有变形和旋转等线性尺度效应的分子团。流体微团是由大量流体质点组成的,但具有线性尺度效应的微小流体团。由上述定义可知:流体是大量流体微团的集合,流体微团又是大量流体质点的集合;流体微团具有变形和旋转等线性尺度效应,而流体质点则没有。

第三节 流体的主要力学性质

一、密度

单位体积流体所具有的质量称为密度,以 ρ 表示。对于均质流体,如其体积为 V ,质量为 m ,则

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

密度的单位为 kg/m^3 。

对非均质流体,某一点的密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

此时的密度是空间位置坐标和时间的函数,即 $\rho = \rho(x, y, z, t)$ 。

在流体力学中也经常使用比容这一物理量,流体的比容是单位质量的流体所占有的体积,用 v 表示,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

比容的单位为 m^3/kg 。

液体的相对密度是指其密度与标准大气压下 4°C 纯水的密度的比值,用 δ 表示,即

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-4)$$

至于气体的相对密度,是指气体密度与特定温度和压力下氢气或者空气的密度的比值,没有统一的规定。常见液体的相对密度见表 1-1。

表 1-1 常见液体的相对密度

液 体	温度, $^\circ\text{C}$	相对密度	液 体	温度, $^\circ\text{C}$	相对密度
蒸 馏 水	4	1.00	航空汽油	15	0.65
海 水	4	1.02 ~ 1.03	轻 柴 油	15	0.83
重质原油	15	0.92 ~ 0.93	润 滑 油	15	0.89 ~ 0.92
中质原油	15	0.85 ~ 0.90	重 油	15	0.89 ~ 0.94
轻质原油	15	0.86 ~ 0.88	沥 青	15	0.93 ~ 0.95
煤 油	15	0.79 ~ 0.82	甘 油	0	1.26
航空煤油	15	0.78	水 银	0	13.6
普通汽油	15	0.70 ~ 0.75	酒 精	15	0.79 ~ 0.80

二、压缩性和膨胀性

1. 压缩性

流体的压缩性是指在温度不变的条件下,流体的体积会随着压力的变化而变化的性质。压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 表示,即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

式中 V ——原有的体积, m^3 ;

dV ——体积的变化量, m^3 ;

dp ——压力的变化量, Pa;

β_p ——体积压缩系数, Pa^{-1} 。

体积压缩系数的物理意义:在一定温度下,变化单位压力所引起的体积相对变化率。因为压力 p 的变化与体积 V 的变化相反,为了保证体积压缩系数为正值,所以上式中才出现负号。体积压缩系数越大表明流体越易于压缩,反之亦然。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数,用 E 表示,单位为 Pa,即

$$E = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{dp}{dV/V} \quad (1-6)$$

水的体积弹性系数见表 1-2。

表 1-2 水的体积弹性系数

GPa

温度, °C	压力, $\times 10^5$ Pa				
	4.90	9.81	19.62	39.24	78.48
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

2. 膨胀性

流体的膨胀性是指在压力不变的条件下,流体的体积会随着温度的变化而变化的性质,其大小用体积膨胀系数 β_t 表示,即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-7)$$

式中 V ——原有的体积, m^3 ;

dV ——体积的变化量, m^3 ;

dt ——温度的变化量, K;

β_t ——体积膨胀系数, K^{-1} 。

体积膨胀系数的物理意义:在一定压力下,单位温度变化所引起的体积相对变化率。

通常情况下,液体的可压缩性和膨胀性都很小,例如:常温常压下水的体积压缩系数约为 10^{-9} 量级,膨胀系数约为 10^{-5} 量级,见表 1-3。通常将以水为代表的液体看成是体积不随压力和温度变化的不可压缩流体,即不可压缩流体的密度为常数。只有在研究水中爆炸和水击等压力变化较大的现象时,才会考虑液体的可压缩性。气体与液体不同,温度和压力的变化都会引起其密度产生显著的变化,有关这一问题将在本书气体动力学基础部分进行详细的分析,这里不再赘述。

表 1-3 水的体积膨胀系数

$\text{K}^{-1} \times 10^{-4}$

压力, Pa	温度, K				
	273 ~ 283	283 ~ 293	313 ~ 323	333 ~ 343	363 ~ 373
1×10^5	0.14	1.50	4.22	5.56	7.19
1×10^7	0.43	1.65	4.26	5.48	7.04
5×10^7	0.15	2.36	4.29	5.23	6.61

三、粘性

流体所具有的阻碍流体流动,即阻碍流体质点间相对运动的性质称为粘滞性,简称粘性。对液体来讲,粘性主要是由液体分子之间的引力引起的;对气体来讲,粘性是由气体分子的热运动引起的。

当流体中存在层与层之间的相对运动时,快层对慢层施加一个拖动力使它加速,同时慢层对快层也施加一个阻力,拖动力和阻力构成一对作用力和反作用力,这就是粘性的表现。这一对大小相等方向相反的力称为流体的内摩擦力或粘性力,粘性力没有必要区分正负,流体在流动过程中要克服粘性力做功而消耗掉自身的能量。

1. 牛顿内摩擦定律

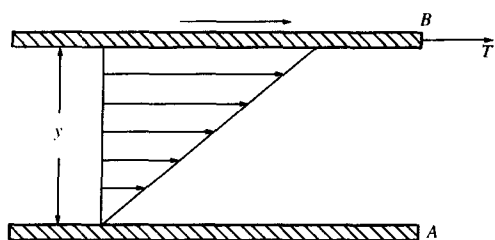


图 1-1 平板间的速度分布

牛顿经过大量的试验研究,于 1686 年提出了确定流体粘性力的“牛顿内摩擦定律”。如图 1-1 所示, A 、 B 为宽度和长度都足够大的平行平板,其间充满着流体。以拉力 T 向右拉动平板 B ,当平板间距 y 和速度 u_0 不是很大时, A 、 B 平板之间的流体会产生图示的线性速度分布。

实验研究表明,运动平板所受到的阻力与其运动速度、面积成正比,与两平板的间距成反比,即

$$T = \mu \frac{u_0}{y} A \quad (1-8)$$

式中 T ——平板受到的粘性力, N ;

u_0 ——平板的运动速度, m/s ;

y ——平板的间距, m ;

A ——平板与流体的接触面积, m^2 ;

μ ——由流体性质决定的物质常数,称为粘滞系数或动力粘度,简称粘度,其单位是 $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$ 。

作用在单位面积上的粘性力称为粘性切应力,以 τ 表示,单位为 Pa 。由式(1-8)可以得到作用在平板上的粘性切应力为

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{u_0}{y} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 du/dy ——单位距离上的速度差,速度梯度, s^{-1} 。

将上式推广到更普遍的流动中,如图 1-2 所示,可得牛顿内摩擦定律的数学表达式为

$$\tau = \mu \left| \frac{du}{dy} \right| = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中的速度梯度项加上了绝对值符号和正负号,这是为了保证粘性切应力永远为正值,因为在普遍的流动中流动速度分布比较复杂,而且随着不同坐标系的选取,速度梯度有时是正值,有时也可能是负值。

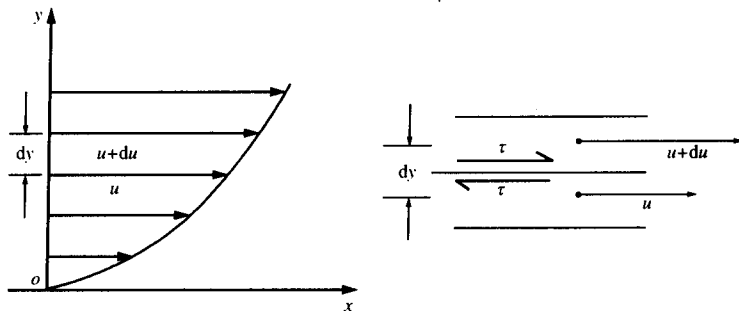


图 1-2 牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律表明:粘性切应力与流场的速度梯度成正比,比例系数为粘度。在应用牛顿内摩擦定律时应了解以下几点:

(1)符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,否则称为非牛顿流体。常见的牛顿流体包括空气、水、酒精等等;非牛顿流体有聚合物溶液、原油、泥浆、血液等等。研究非牛顿流体流动的学科称为非牛顿流体力学。

(2)静止流体中,由于流体质点间不存在相对运动,速度梯度为 0,因而不存在粘性切应力。

(3)流体的粘性切应力与压力的关系不大,而取决于速度梯度的大小;固体间的摩擦力与固体间的压力成正比,而与其间的相对速度无关。

(4)牛顿内摩擦定律只适用于层流流动,不适用于紊流流动,紊流流动中除了粘性切应力之外还存在更为复杂的紊流附加应力。

2. 粘度

通过前面的分析可知,式(1-8)中的比例系数 μ 是流体的动力粘度或粘度,它的大小可以反映出流体粘性的大小,其数值等于单位速度梯度引起的粘性切应力的大小。

在流体力学中,还将动力粘度与密度的比值称为运动粘度,用 ν 来表示,其单位为 m^2/s ,亦即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

研究表明,流体的粘度与压力的关系不大,但与温度有着密切的关系。液体的粘度随着温度的升高而减小,气体的粘度随着温度的升高而增大。这是由于液体的粘性是由分子间的引力造成的,温度升高时分子间的引力减小,液体的粘度也就要减小;气体的粘性是由分子热运动引起的,温度升高时气体分子热运动加剧,相邻气体层之间的动量交换也随之加剧,气体的粘度也就要增大。

自然界中的所有流体都是具有粘性的,粘度不为 0 的流体称为粘性流体或者实际流体。但在有些研究中却要引入一种理想化了的流体——没有粘性的流体,称为无粘流体或理想流体,这种流体实际上并不存在。但是,引入理想流体的概念是有实际意义的,由于粘性流动十分复杂,影响因素很多,理论上求解实际流体流动规律困难很大,甚至是不可能的。因此,对粘性力不起主要作用的流动,例如:在研究升力时的流体绕机翼的流动,推力时的流体绕螺旋桨

的流动,以及附面层以外的流动等等,常常把粘性流动简化为无粘流动,找出流动规律后再考虑粘性影响并加以修正,这种处理方法是可行的,既抓住了主要矛盾,也使问题得到了简化。

[例 1-1] 如图 1-3 所示,一块面积为 A 的平板,以匀速 u_0 水平向右运动,其与固定的平板间充满两种不同的液体,假设两层流体内部的速度分布为直线分布,试求平板间流体内部的粘性应力。

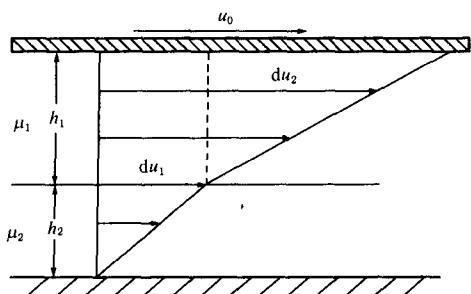


图 1-3 例 1-1 图

解:由两层流体内部的速度分布为直线分布和牛顿内摩擦定律可知,每层流体内部的粘性切应力是相同的。同时,在两种液体的交界面上的粘性切应力又互为作用力和反作用力,大小相等。由此可得

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau$$

假设两层流体中最上层与最下层的速度差分别为 du_1 和 du_2 , 则有

$$\mu_1 \frac{du_1}{h_1} = \mu_2 \frac{du_2}{h_2}$$

$$u_0 = du_1 + du_2$$

联立上两式可解出

$$du_1 = \frac{\mu_2 h_1}{\mu_2 h_1 + \mu_1 h_2} u_0$$

所以,

$$\tau = \mu_1 \frac{du_1}{h_1} = \frac{\mu_1 \mu_2}{\mu_2 h_1 + \mu_1 h_2} u_0$$

当然,在上述求解过程中也可以先解出 du_2 来求得 τ 值。另外,如果是多于两层流体的情况,是否还有解、如何求解以及解的形式怎样,读者不妨一试。

四、表面张力

液体表面总是取收缩趋势,如空气中的自由液滴总是呈球形。这种收缩趋势表明,液体表面各部分之间存在相互作用的拉力,使其表面总是处于紧张状态。液体表面单位长度上的这种拉力就称为表面张力,以 σ 表示,其单位为 N/m 。

表面张力是很小的,在一般情况下可以忽略不计,但在某些特殊问题如毛细管中,表面张力就成为不可忽略的影响因素。因此,在毛细玻璃管制成的水力仪表中,必须考虑到表面张力的影响。将两根直径很小的玻璃管插在水和水银两种液体中,见图 1-4。两种液体在细玻璃管中的液位与外面的液位有明显差别,这种现象称为毛细现象。毛细现象的决定因素有液体对固体表面的润湿性和液体表面张力。润湿性是指液体与固体接触时,液体在固体表面上表现为扩张还是收缩的性质。对玻璃来讲,水具有润湿性,水银则不具备润湿性。

决定毛细现象的因素有很多,其中流体与管材的理化性质是起着决定性因素的,除此之外还有哪些因素呢? 现以水为例(见图 1-5),推导毛细管中液面升高的数值。水对玻璃的润湿性使得表面张力向上拉液柱,平衡状态下附着力与重力相平衡,即

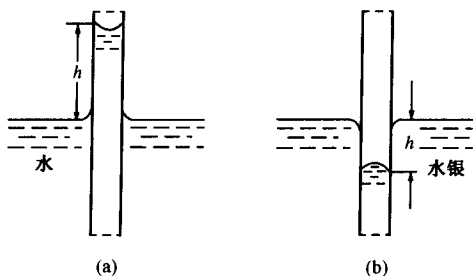


图 1-4 毛细现象

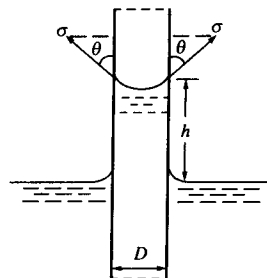


图 1-5 表面张力的影响

$$\pi d \sigma \cos \theta = \rho g \frac{\pi d^2 h}{4}$$

解之可得

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d}$$

由此可见,除了流体与管材的理化性质决定的表面张力、接触角、密度等参数外,毛细管的直径也是一个重要的因素。如果读者对润湿性和毛细现象比较感兴趣,可参考油层物理等方面的书籍进行深一步的学习。水和空气的物理性质见表 1-4,几种常见液体在标准大气压下的物理性质见表 1-5。

表 1-4 水和空气的物理性质

温度 ℃	水			空气(标准大气压下)		
	密 度 ρ kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^3$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^6$ m ² /s	密 度 ρ kg/m ³	动力粘度 $\mu \times 10^3$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^6$ m ² /s
0	999.8	1.792	1.792	1.293	0.0172	13.7
5	1000.0	1.519	1.519	1.270	—	—
10	999.7	1.308	1.308	1.248	0.0178	14.7
15	999.1	1.140	1.141	1.226	—	—
20	998.2	1.005	1.007	1.205	0.0183	15.7
25	997.0	0.894	0.897	1.185	—	—
30	995.7	0.801	0.804	1.165	0.0187	16.6
40	992.2	0.656	0.661	1.128	0.0192	17.6
50	988.0	0.549	0.556	1.093	0.0196	18.6
60	983.2	0.469	0.477	1.060	0.0201	19.6
70	977.8	0.406	0.415	1.029	0.0204	20.6
80	971.8	0.357	0.367	1.000	0.0210	21.7
90	965.3	0.317	0.328	0.973	0.0216	22.9
100	958.4	0.284	0.296	0.947	0.0218	23.6

表 1-5 几种常见液体在标准大气压下的物理性质

液 体	温 度 ℃	密度 ρ kg/m ³	相对密度 δ	粘度 $\mu \times 10^4$ N · s/m ²	表面张力 σ N/m	蒸发压力 p_v kN/m ²	弹性模数 $E \times 10^{-6}$ N/m ²
苯	20	895	0.90	6.5	0.029	10.0	1030
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7	0.026	12.1	1100
原油	20	856	0.86	72	0.03	—	—
汽油	20	678	0.68	2.9	—	55	—
甘油	20	1258	1.26	14900	0.063	0.000014	4350
氢	-257	72	0.072	0.21	0.003	21.4	—
煤油	20	808	0.81	19.2	0.025	3.20	—
氧	-195	1206	1.21	2.8	0.015	21.4	—
水银	20	13550	13.56	15.6	0.51	0.00017	26200
水	20	998	1.00	10.1	0.073	2.34	20700

第四节 作用在流体上的力

流体无论处于静止还是运动状态,都受到各种力的作用。因此,在研究流体静力学和动力学之前,应该首先分析一下作用在流体上的力。作用在流体上的力按照作用方式可分为两类,即质量力与表面力。

一、质量力

质量力作用在每一个流体质点上,并与流体质量成正比。对于均质流体,质量力也必然与流体的体积成正比,所以质量力又称为体积力。质量力不是因为流体与其他物体接触而产生的力,属于非接触力,常见的重力和惯性力等都属于质量力。

流体力学中,质量力采用单位质量流体所受到的质量力 f 来表示,即

$$f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{F}{m} \quad (1-12)$$

或

$$\begin{aligned} f &= \frac{F_x}{m}i + \frac{F_y}{m}j + \frac{F_z}{m}k \\ &= Xi + Yj + Zk \end{aligned} \quad (1-13)$$

以上两式中的 F_x 、 F_y 、 F_z 依次为 ΔV 内质量为 m 的流体所受到的质量力在 x 、 y 、 z 三个坐标方向上的分量; X 、 Y 、 Z 依次为单位质量流体所受到的质量力 f 在 x 、 y 、 z 三个坐标方向上的分量。

除了与质量有直接关联的引力和惯性力外,流体还可能受其他一些非接触力,如磁流体所受的电场力和磁场力等,尽管这些力与流体质量无直接关系,但在流体力学中仍然统称为质量力。流体力学中经常遇到作用在流体上的质量力只有重力的情形,如果取铅直向上的方向为 z 轴的正方向,则有

$$X = Y = 0, Z = -g$$