

高等学校教学用书

工程流体力学

袁恩熙 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是针对石油及天然气储运工程和石油机械工程专业的需要,在长期的教学实践经验基础上编写成的。

全书分九章。一至五章是各专业通用的基本内容,包括流体及其主要物理性质,流体静力学、流体运动学与动力学基础,流体阻力和水头损失,压力管路的水力计算;六至九章是适应各专业不同需要的专题内容,包括一元不稳定流、理想流体二元不可压缩流动、气体的运动、非牛顿流体的流动。为了教学的需要,每章附有思考问题和习题。

本书可作为石油高等院校有关专业的教科书及厂矿科技人员的参考书。

高等学校教学用书

工程流体力学

袁恩熙 主编

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16开本 20印张 512千字 印 28001 - 31000

1986年10月北京第1版 1998年8月北京第8次印刷

ISBN 7 - 5021 - 0278 - 7/ TE·274(课)

定价:20.00元

编者的话

本书根据 1982 年华东石油学院机械系各专业修订的流体力学课程教学内容,参照教育部 1982 年 10 月工程流体力学大纲定稿会上由水力学教材编审小组审定的四年制动力机械、热能工程等专业试用的高等工业学校工程流体力学教学大纲(草案)而写出的。不同专业使用本书时,可按照需要,选择讲授,这些章节在书中都标有 * 号。

本书编写的具体分工为:袁恩熙编绪论及第四、五、六、七、九章;许震芳编第一、二、三章;王汝元编第八章。全书由袁恩熙主编,白家祉教授主审。

鉴于目前工业仪表仍多使用工程单位制,书中以国际单位制为主,兼顾工程单位和物理单位。

由于编者水平所限,内容选择与安排上难免有不当甚至谬误之处,敬希读者给予指正。将表示深切感谢。

目 录

绪论.....	(1)
第一章 流体及其主要物理性质.....	(3)
§ 1 - 1 流体的概念.....	(3)
§ 1 - 2 流体的主要物理性质.....	(3)
§ 1 - 3 作用在流体上的力	(10)
第二章 流体静力学	(13)
§ 2 - 1 流体静压力及其特性	(13)
§ 2 - 2 流体平衡微分方程式	(15)
§ 2 - 3 重力作用下的流体平衡	(19)
§ 2 - 4 几种质量力作用下的流体平衡	(26)
§ 2 - 5 静止流体作用在平面上的总压力	(30)
§ 2 - 6 静止流体作用在曲面上的总压力	(32)
§ 2 - 7 物体在液体中的潜浮原理	(35)
第三章 流体运动学与动力学基础	(45)
§ 3 - 1 研究流体流动的方法	(45)
§ 3 - 2 流体运动的基本概念	(48)
§ 3 - 3 连续性方程	(52)
§ 3 - 4 理想流体运动微分方程及伯诺利方程	(54)
§ 3 - 5 实际流体总流的伯诺利方程	(60)
§ 3 - 6 泵对液流能量的增加	(70)
§ 3 - 7 系统与控制体	(72)
§ 3 - 8 稳定流的动量方程和动量矩方程	(75)
第四章 流体阻力和水头损失	(87)
§ 4 - 1 管路中流动阻力产生的原因及分类	(87)
§ 4 - 2 两种流态及转化标准	(88)
§ 4 - 3 实际流体运动微分方程式——纳维 - 斯托克斯方程式	(91)
§ 4 - 4 因次分析和相似原理	(97)
§ 4 - 5 圆管层流分析.....	(109)
§ 4 - 6 紊流的理论分析.....	(113)
§ 4 - 7 圆管紊流沿程水力摩阻的实验分析.....	(121)
§ 4 - 8 局部水力摩阻.....	(128)
* § 4 - 9 附面层理论基础	(131)
第五章 压力管路的水力计算.....	(144)
§ 5 - 1 管路特性曲线.....	(144)
§ 5 - 2 长管的水力计算.....	(145)

* § 5 - 3	沿程均匀泄流及装卸油鹤管	(158)
§ 5 - 4	短管的水力计算.....	(160)
§ 5 - 5	孔口和管嘴泄流.....	(163)
第六章	一元不稳定流.....	(171)
§ 6 - 1	一元不稳定流基本方程.....	(171)
§ 6 - 2	水击现象.....	(174)
§ 6 - 3	水击压力的计算.....	(177)
* § 6 - 4	水击基本方程	(179)
§ 6 - 5	变水头泄流及排空.....	(185)
第七章	理想流体二元不可压缩流动.....	(191)
§ 7 - 1	流体微团运动的分析, 势流和涡流	(191)
§ 7 - 2	平面势流.....	(198)
§ 7 - 3	势流的叠加原理.....	(205)
§ 7 - 4	绕流的升力和阻力.....	(211)
第八章	气体的运动.....	(221)
§ 8 - 1	气体动力学诸方程.....	(221)
§ 8 - 2	滞止参数、气体动力学函数及其应用	(228)
§ 8 - 3	微弱扰动在亚声速流和超声速流中的传播.....	(239)
* § 8 - 4	激波	(241)
§ 8 - 5	气体的加速与减速.....	(249)
* 第九章	非牛顿流体的流动	(266)
§ 9 - 1	非牛顿流体的流变性和流变方程.....	(266)
§ 9 - 2	非牛顿流体的研究方法.....	(269)
§ 9 - 3	塑性流体的流动规律.....	(271)
§ 9 - 4	幂律流体的流动规律.....	(278)
§ 9 - 5	管流研究的特性参数法.....	(280)
§ 9 - 6	幂律流体的雷诺数及紊流的水头损失.....	(284)
§ 9 - 7	非牛顿流体物理参数的测定.....	(286)
中外人名对照表.....		(294)
附录.....		(295)
附录	不同温度下水和空气的密度、重度和粘度	(295)
附录	输水管局部阻力计算表.....	(295)
附录	输油管水力计算用表.....	(299)
附录	气体动力学函数表.....	(301)
附录	国际单位、工程单位、物理单位对照换算表.....	(312)
参考书目.....		(313)

绪 论

一、工程流体力学的研究对象

工程流体力学属于力学的一个分支。它研究流体的平衡和运动的基本规律,以及流体与固体的相互作用的力学特点,用以分析解决工程设计和使用中的实际问题。

流体按压缩性的大小分气体和液体。气体极易压缩,亦称为可压缩流体;液体几乎不可压缩,即称为不可压缩流体。按变形特点又把流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体指受力后极易变形,且切应力与变形率成正比的低粘性流体;凡不同于牛顿流体的都称为非牛顿流体。

从学科上看,属于这一范畴的有理论流体力学、工程流体力学和水力学。理论流体力学侧重于用数学分析方法进行理论探讨,水力学侧重于用物理分析和实验方法进行实用计算,而工程流体力学则趋向于两者互相结合,从实用角度,对工程实际中涉及的问题建立相应的理论基础。

本书主要结合石油及天然气储运、石油机械等有关石油工程涉及的水力现象和问题,从理论上作较系统的阐述,在实验方法上作相应的补充,并结合工程实际列举例题和习题,以提高分析和解决问题的能力。因此,这是一本工程流体力学的教材。主要的研究对象是牛顿流体,包括液体和气体,对非牛顿流体仅作扼要的介绍。

二、流体力学的发展简况

研究流体通常以水为代表,因为它是人类生产和生活中一刻也不能缺少的物质。自古以来,人类逐水草而居。劳动人民为了生存而与自然斗争,兴水利,除水害,在治河防洪、农田灌溉、河道航运、水能利用各方面总结了丰富的经验。我国秦代李冰父子设计建造的四川都江堰工程具有相当高的科学水平。隋代大运河工程,至今为人称颂。早在秦汉时代就不断改进水磨、水车和水力鼓风设备,汉代张衡还创造了水力带动的浑天仪,说明水力机械当时已有很大进展。又如我国古代计时用的铜壶滴漏就已应用了孔口泄流原理。因此,我们的祖先对水流的性质、水流的运动规律,已有相当的认识,使流体力学原理在很多方面得到应用。但由于我国长期处于封建王朝统治,生产力得不到较快发展,因而虽有很多经验,却未能从理论上加以提高。

在西方也和我国类似。公元前数百年就已有了水压唧筒等水力机械,公元前 250 年阿基米德就发表了一篇“论浮体”的文章,但以后,长期也处于封建统治,科学停滞不前。直到了 17 世纪,才陆续出现了一些水力原理的基本论著。如托里拆利(1643 年)提出孔口泄流定律,巴斯加(1650 年)提出压强传递定律,牛顿(1686 年)提出液体内摩擦定律等等,对简单水力现象提供理论依据。

18 世纪英国大规模产业革命,生产力大幅度上升,流体力学也伴随其他学科有了较大进展。伯诺利能量方程、欧拉平衡和运动微分方程给流体力学奠定了理论基础。随后,在 19 世纪这些理论又得到进一步发展,在纳维—斯托克斯、泊阿松等人的努力下,形成粘性流体力学理论和旋涡理论。同时在实验方面也在雷诺、谢才、达西等人的工作下,发现了两种流态并进行了水力摩阻的研究。20 世纪航空事业的发展,促进了空气动力学的研究,儒柯夫斯基、普朗

特、卡门等人作出了重大贡献,附面层理论也在此时逐渐形成。非牛顿流体力学也在近二三十年来由于各种新工业的需要有了很大的发展。近代流体力学更进一步划出许多分支,如磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学等等。随着科学的飞速发展,电子计算机的广泛应用,流体力学的研究领域将不断扩大和加深。

三、流体力学在石油工业中的地位和作用

我国的石油工业正以前所未有的速度向前发展,60年代做到原油自给,70年代出口逐年有所增加,80年代正面临进入世界的前列。由于新技术的应用,后备储量持续增长。钻井、采油工艺、炼油设备、油品储存和运输,都离不开管、罐、泵的设计与使用,这就涉及到流体力学的许多方面,诸如分析流体在管道内的流体规律,压力、阻力、流速和输量的关系,据以设计管径,校核管材强度,布置管线以及选择泵的大小和类型,设计泵的安装位置等;我们也需要用流体力学原理分析校核油罐或其他储液容器的结构强度;估计容器、油槽车、油罐的装卸时间;解释有关气蚀、水击等现象;以及了解计量用的水力仪表的原理等。有时还会遇到输送“三高”(高含蜡、高粘度、高凝固点)原油、增粘或降粘剂以及某些化工产品,这就涉及到非牛顿流体的力学原理。所有这些,都要求从事石油工艺技术的科学工作者必须具备工程流体力学的知识,以便在工程的建设和管理中,更好地发挥作用。

学习工程流体力学,不仅为了掌握油、气、水运动的规律,更重要的是运用这些规律改进工程的设计与管理,开展技术革新和技术革命,使石油工业赶超世界先进水平。

流体的流动虽有千变万化,我们只要从实际情况出发,运用辩证唯物主义观点和历史唯物主义观点,在分析中抓住主要矛盾和矛盾的主要方面,就能找出变化的实质。要注意矛盾的普遍性和特殊性,掌握一分为二的观点以及一现象与他现象的联系。通过观察、实践、学习,提高分析问题的能力。工程流体力学就是以物理为基础,数学为工具,力学为依据,在不断地总结生产实践和科学实验的经验的基础上发展起来的。

第一章 流体及其主要物理性质

流体的物理性质决定于流体平衡和运动规律的内部原因,因此在没有讨论流体力学规律之前,应首先了解流体的概念和流体的主要物理性质。

§ 1 - 1 流体的概念

流体包括液体和气体。它同固体相比较,分子间引力较小,分子运动较强烈,分子排列松散,这就决定了液体和气体具有相同特性,即不能保持一定的形状,而具有很大流动性。

从力学性质来看,固体具有抵抗压力、拉力和切力三种能力。因而在外力作用下,通常只发生较小的变形,而且到一定程度后变形就停止。流体由于不能保持一定的形状,所以它仅能抵抗压力而不能抵抗拉力和切力。当它受到切力作用时,就要发生连续不断的变形即流动。以上就是流体和固体的显著区别。

液体的分子距和分子有效直径差不多是相等的。当液体加压时,由于分子距稍有缩小,而出现强大的分子斥力来抵抗外力。这就是说,液体分子距很难缩小,而可以认为液体具有一定的体积,因此通常称为不可压缩流体。又由于分子引力作用,液体有力求自身表面面积收缩到最小的特性,所以在大容器里只能占据一定的体积,而在上部形成自由分界面。

一般地说,气体分子距很大,分子引力很小。例如常温常压下,空气分子距为 3×10^{-7} cm,其分子有效直径的数量级为 10^{-8} cm。可见分子距比分子有效直径大得很多。因此当分子距缩小很多时,才会出现分子斥力。故通常称气体为可压缩流体。又因分子距很大,分子引力很小,这就使气体既没有一定形状,也没有一定体积。因而一定量气体进入较大容器内,由于分子不断地运动,结果使气体均匀充满容器,而不能形成自由表面。

流体的真实结构是由分子组成的。显然,分子间是有空隙的。但是流体力学研究的并不是个别分子微观运动,而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力的作用下所引起的机械运动。因此在流体力学中引入连续介质的假定,即认为流体质点是微观上充分大、宏观上充分小的分子团,它完全充满所占空间,没有空隙存在。这就能摆脱了复杂的分子运动,而着眼于宏观机械运动。这在应用上既方便,又有足够的精确性。因为在标准状态下, 1 m^3 气体中有 2.7×10^{16} 个分子, 1 m^3 液体中有 2.7×10^{21} 个分子。所以忽略分子间隙是有根据的,而且是可行的。流体看成连续介质的单元体,则反映宏观流体的各种物理量都是空间坐标的连续函数。因此以后讨论中都可以引用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。这一假设对大多数流体是适用的。但对稀薄的气体,连续假设便不能适用,而必须考虑为不连续流体。

§ 1 - 2 流体的主要物理性质

一、密度

惯性就是物体要维持原有运动状态的物理性质,任何运动状态的改变都必须克服惯性。

表征惯性的物理量是质量,质量愈大,惯性也愈大,运动状态愈难改变。

流体单位体积内所具有的质量称为密度,以 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。对于均质流体,其体积为 V ,质量为 M ,则

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

对于非均质流体,根据连续介质的假设,则

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{M}{V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-2)$$

二、重度

物体之间相互具有吸引力,这个吸引力称为万有引力,作用是企图改变物体原有运动状态而使其相互接近。在流体运动中,仅考虑地球对流体的引力。表征地球引力大小的物理量就是重力。流体在重力作用下便显示出重量。

流体单位体积内所具有的重量称为重度,或称为容重、重率,以 γ 表示,单位为 N/m^3 。对于均质流体,设其体积为 V ,重量为 G ,则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

对于非均质流体,根据连续介质的假设,则

$$\gamma = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{G}{V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-4)$$

在气体中,常用比容这一物理量。比容是单位重量流体的体积,以 v 表示,单位为 m^3/N 。比容和重度成倒数关系,即

$$v = \frac{1}{\gamma} \quad (1-5)$$

根据牛顿第二定律可知,质量和重量的关系为

$$G = Mg$$

对此式两边同除以体积 V 后,则得

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1-6)$$

式中重力加速度 g 在国际单位制中数值为 9.80 m/s^2 。

再说明一下相对密度这个概念。液体的相对密度是指液体的质量与同体积的 4°C 蒸馏水质量之比。为什么选择 4°C 呢?这是由于蒸馏水在 4°C 时密度最大,此时它的密度是 1000 kg/m^3 。相对密度是一个比值,是个无因次数。

相对密度一般用 d 表示。就液体来说,它与密度或重度有以下的关系

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{水}}} \quad (1-7)$$

而气体的相对密度是指在同样的压强和温度条件下,气体密度与空气的密度之比。
某些常见的液体的相对密度见表 1 - 1。

表 1 - 1 某些常见液体的相对密度

液 体	相对密度	温 度	液 体	相对密度	温 度
蒸 馏 水	1. 00	4	航 空 汽 油	0. 65	15
海 水	1. 02 ~ 1. 03	4	轻 柴 油	0. 83	15
重 原 油	0. 92 ~ 0. 93	15	润 滑 油	0. 89 ~ 0. 92	15
中 原 油	0. 88 ~ 0. 90	15	重 油	0. 89 ~ 0. 94	15
轻 原 油	0. 86 ~ 0. 88	15	沥 青	0. 93 ~ 0. 95	15
煤 油	0. 79 ~ 0. 82	15	丙 三 醇	1. 26	0
航 空 煤 油	0. 78	15	汞(水 银)	13. 6	0
普 通 汽 油	0. 70 ~ 0. 75	15	乙 醇(酒 精)	0. 79 ~ 0. 80	15

三、压缩性和膨胀性

1. 压缩性

在温度不变的条件下,流体在压力作用下体积缩小的性质称为压缩性。压缩性大小,用体积压缩系数 ρ 表示,它代表压力增加 1Pa 时所发生的体积相对变化量,即

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

式中 V ——原有体积, m^3 ;
 dV ——体积改变量, m^3 ;
 dp ——压力改变量, Pa;
 ρ ——体积压缩系数, Pa^{-1} 。

因为 dV 与 dp 的变化方向相反,即压力增加时体积减小,故上式中加一负号,以便系数 ρ 永为正值。水的 ρ 值如表 1 - 2 所示。

表 1 - 2 水的体积压缩系数

压力, $10^5 Pa$	5	10	20	40	80
$\rho, 10^{-9} Pa^{-1}$	0. 529	0. 527	0. 521	0. 513	0. 505

从上表可以看出,压力为 $5 \times 10^5 Pa$ 情况下,每增加 $10^5 Pa$ 时,水的体积只改变万分之 0. 529,可见水的压缩性是很小的,其他液体压缩性也是很小的。在一般情况下,可以略去这种微小的体积变化,当作不可压缩流体来处理。对于不可压缩流体,体积保持不变,根据式(1 - 2)得

$$= \text{常数}$$

气体易于压缩,它的体积变化由状态方程来决定,所以气体密度的变化可以表示为

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1 - 9)$$

其中 ρ 为压力, T 为绝对温度, R 为气体常数,对于空气 $R = 287.06 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ 。气体在高速流动时,它的体积变化不能忽略不计,可作为可压缩流体来处理。对于可压缩流体,体积的变化由温度和压力来决定,因而它的密度表示为

$$\rho = f(p, T)$$

即密度可表示为压力和温度的函数。当密度仅是压力的函数,而与温度无关时,密度表示为

$$\rho = f(p)$$

最后要指出的是:研究一个具体流体问题时,是否考虑压缩性的影响不决定于流体是气体还是液体,而是由具体条件来决定。例如在标准大气压条件下,当空气的流速等于 68 m/s 时,不考虑压缩性所引起的相对误差约等于 1% ,这在工程计算中一般可以忽略不计。所以低速流动的气体可以认为是不可压缩流体。而在研究管中的水击现象时,需把水作为可压缩流体来处理,因为水的压缩性虽然小,但在这类问题中却不能忽视。

2 膨胀性

在压力不变的条件下,流体温度升高时,其体积增大的性质称为膨胀性。膨胀性大小用体积膨胀系数 β_t 表示,它代表温度每增加 1°C 时所发生的体积相对变化量,即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1 - 10)$$

式中 dt ——温度改变量, $^\circ\text{C}$;

β_t ——体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

实验指出,在 1 大气压下,在温度较低时($10 \sim 20^\circ\text{C}$),温度每增加 1°C ,水的体积相对改变量仅为万分之 1.5 ;温度较高时($90 \sim 100^\circ\text{C}$),也只改变万分之 7 。所以在实际计算中,一般不考虑液体的膨胀性。

表 1 - 3 给出水的体积膨胀系数随压力和温度而变化的数值。

表 1 - 3 水的体积膨胀系数

$p, 10^5 \text{ Pa}$ \ / \ $t, ^\circ\text{C}$	0 ~ 10	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
1	0.000014	0.000150	0.000422	0.000556	0.000719
100	0.000043	0.000165	0.000422	0.000548	0.000704
500	0.000149	0.000236	0.000429	0.000523	0.000661

四、粘性

粘性是流体具有的一个重要性质。粘性指的是当液体微团发生相对运动时产生切向阻力的性质。流体是由分子组成的物质,当它以某一速度流动时,其内部分子间存在着吸引力。此外,流体分子和固体壁之间有附着力作用。分子间的吸引力和流体分子与壁面附着力都属于抵抗流体运动的阻力,而且是以摩擦形式表现出来。其作用是抵抗液体内部的相对运动,从而

影响着流体的运动状况。由于粘性存在,流体在运动中克服摩擦力必然要作功,所以粘性也是流体中发生机械能量损失的根源。

1. 牛顿内摩擦定律

为了定量确定流体的粘性,可以取两块相互平行的平板,其间充满流体。下板固定不动,上板以 u_0 速度平行下板运动时,由于流体的粘性,两板间流体便发生不同速度的运动状态:粘附在动板下面的流体层将以 u_0 的速度运动,愈往下速度愈小,直到附在固定板流体层的速度为零,速度分布按直线规律变化,如图 1 - 1 所示。

图 1 - 1 速度分布规律

从以上事实说明:运动较慢的流体层,都是在较快的流体层带动下才运动。同时,快层也受到慢层的阻碍,而不能运动得更快。这样,相邻流体层发生相对运动时,快层对慢层产生一个切力,使慢层加速。根据作用与反作用原理,慢层对快层有一个反作用力,使快层减速,它是阻止运动的力,称为阻力。切力和阻力是大小相等方向相反的一对力,分别作用在两个流体层的接触面上。这一对力是在流体内部产生的,所以也叫内摩擦力。为了确定内摩擦力,牛顿在 1686 年根据试验提出并经后人加以验证的液体内摩擦定律,其内容如下:取无限薄的流体层进行研究,坐标为 y 处流速为 u ,坐标为 $y + dy$ 处流速为 $u + du$,显然在厚度为 dy 的薄层中速度梯度为 $\frac{du}{dy}$ 。液层间内摩擦力 T 的大小与液体性质有关,并与速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 和接触面积 A 成正比,而与接触面上压力无关,即

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy} \quad (1 - 11)$$

符合这样内摩擦定律的流体称为牛顿型流体,否则称为非牛顿型流体。

设 τ 代表单位面积上的内摩擦力,即粘性切应力,则

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy}$$

式(1 - 11) 中的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 是一个重要概念,我们讨论如下:

在运动流体中取一微小矩形

ABCD,如图 1 - 2, AB 层速度为 u , CD 层速度为 $u + du$,两层间垂直距离为 dy ,经过 dt 时间后 A、B、C、D 各点分别运动至 A'、B'、C'、D' 点,可见

$$ED = DD' - AA' = (u + du)dt - udt = du dt$$

因此

$$du = \frac{ED}{dt}$$

由此得速度梯度

$$\frac{du}{dy} = \frac{ED}{dydt} = \frac{tgd}{dt} = \frac{d}{dt}$$

我们知道 d 是矩形 ABCD 在 dt 时间后剪切变形角度,这就表明速度梯度实质上就是流体运动时的剪切变形角速度。

从以上可以得出流体一个重要特性,即流体中的切应力与剪切变形角速度成正比。

式(1-11)中 μ 是与流体种类、温度有关的系数,称为动力粘性系数,或简称粘度。

式(1-11)中 \pm 号是为 T 、 τ 永为正值而设的,即当 $\frac{du}{dy} > 0$ 时取正号,当 $\frac{du}{dy} < 0$ 时取负号。

由方程式可知,当 $\frac{du}{dy} = 0$ 时,则 $T = \tau = 0$,就是指流体质点间没有相对运动,即流体处于静止或相对静止状态。

2 粘性系数或粘度

粘性系数的物理意义:在相同的 $\frac{du}{dy}$ 情况下, μ 值表征流体粘性大小;另一方面,当 $\frac{du}{dy} = 1$ 时,在数值上 μ 等于 τ 。因此,也可以说,当速度梯度等于1时,在数值上 μ 就等于接触面上的切应力。

在国际单位制中, τ 的单位是 N/m^2 ,而 $\frac{du}{dy}$ 在单位是 $1/s$,故 μ 的单位为 $N \cdot s/m^2$ 。在物理单位制中, μ 的单位是(泊)。1P = 0.1Pa·s。因为泊单位有时用之过大,常用泊的百分之一来表示,叫做厘泊,符号为 cP。

$$1P = 100cP$$

在流体力学的分析计算中,常出现动力粘性系数 μ 与流体密度 ρ 的比值,称为运动粘度,以 ν 表示之,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

其国际单位为 m^2/s ;物理单位是 cm^2/s ,也叫做斯,符号为 St。斯的百分之一称为厘斯,符号为 cSt。

$$1St = 100cSt$$

因为 ν 具有运动学量纲,故称为运动粘度。

3 温度对粘度的影响

温度对粘度的影响比较显著。温度升高时液体的 μ 值降低,而气体的 μ 值反而加大。这是由于液体的分子间距较小,相互吸引力起主要作用,当温度升高时,间距增大,吸引力减小。气体分子间距较大,吸引力影响很小,根据分子运动理论,分子的动量交换率因温度升高而加剧,因而使切应力也随之增加。

水和空气在不同温度下的动力粘度和运动粘度值见附录 。

实际流体都是有粘性的,因此在流体流动时,都产生内摩擦力。考虑摩擦力来研究运动规律是很复杂的。在流体力学中为了使研究问题简化,而引入理想流体的概念,即忽略粘性,认为是没有粘性的流体,称为理想流体。这样,理想流体运动时,是不产生内摩擦力的。在研究流体运动问题时,可以先研究简化了的理想流体,待得出结果后,再考虑实际流体的粘性,对所得理论结果进行相应的修正。

必须指出,上述牛顿内摩擦定律对于诸如含胶质和沥青质较多的原油及钻井液等是不适用的,这些液体称为非牛顿流体,其特性在第九章讨论。

五、表面张力

由于液体的分子引力极小,一般来说,它只能承受压力,不能承受张力。但是在液体与大气相接触的自由面上,由于气体分子的内聚力和液体分子的内聚力有显著差别,使自由表面上液体分子有向液体内部收缩的倾向,这时沿自由表面上必然有拉紧作用的力,使自由表面处于拉伸状态。单位长度上这种拉力便定义为表面张力,以表面张力系数 来表示。

表面张力除产生在液体和气体相接触的自由表面外,在液体与固体相接触的表面上,也会产生附着力。

因表面张力系数 值不大,在工程上一般可以忽略不计。但是,在毛细管中,这种张力可以引起显著的液面上升和下降,即所谓毛细管现象。因此,在用某些玻璃管制成的水力仪表中,必须注意到表面张力的影响。如图 1 - 3 所示,当玻璃管插入水(或其他能够润湿管壁的液体)中时,由于水的内聚力小于水同玻璃间的附着力,水将润湿玻璃管的内外壁面。在内壁面由于管径小,水的表面张力使水面向上弯曲并升高。当玻璃管插入水银(或其他不润湿管壁的液体)中时,由于水银的内聚力大于水银同玻璃间的附着力,水银不能湿润玻璃,水银面向下弯曲,表面张力将使玻璃管内的液柱下降。

图 1 - 3 表面张力的影响

图 1 - 4 毛细管升高

现以水为例推导毛细管中液面升高的数值。如图 1 - 4 所示,表面张力拉液柱向上,直到表面张力在垂直方向上的分力与所升高液柱的重量相等时,液柱就平衡下来。如果 D 为管径, θ 为液体与玻璃的接触角, γ 为液体重度, h 为液柱上升高度,则管壁圆周上总表面张力在垂直方向的分力为 $D \gamma \cos \theta$,其方向向上。上升液柱重量为 $\frac{1}{4} D^2 h \gamma$,其方向向下。此二者相等,有

$$D \gamma \cos \theta = \frac{1}{4} D^2 h \gamma$$

所以

$$h = \frac{4 \gamma \cos \theta}{D}$$

可见,液体上升高度与管子直径成反比,并与液体种类及管子材料有关。在 20℃ 时,水与玻璃的接触角 $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$;水银与玻璃接触角 $\theta = 139^\circ$ 。考虑到水与水银的 γ 及 $\cos \theta$ 值后,即可得出 20℃ 时水在玻璃毛细管中上升高度为 $h = \frac{29.8}{D}$ mm,水银在玻璃毛细管中下降的高度为 $h = \frac{10.15}{D}$ mm,式中 D 的单位为 mm。

§ 1 - 3 作用在流体上的力

流体每一质点无论处于运动或平衡状态,都受到各种力。所以在研究力学规律之前,可按流体的概念及物理性质来分析作用于流体上的力,如按力的表现形式分为质量力和表面力两类。

一、质量力

质量力作用于流体每一质点上,并与所作用的流体质量成正比。在均质液体中,质量力也必然与受作用的流体的体积成比例,所以又称体积力。设在密度为 ρ 的运动流体中,取一面积为 A 、厚度为 δ 的单元体,如图 1 - 5 所示,其质量 $M = \rho V$ 。现分析其质量力。

由于流体受地心引力,故必受重力

$$G = Mg$$

当我们应用达朗伯原理研究流体的加速运动时,虚加在流体质点的惯性力也属于质量力。这种力,在直线加速运动中,只有沿直线的惯性力 I

图 1 - 5 作用在流体上的力

$$I = M \cdot a$$

在一般曲线运动中有离心惯性力 R

$$R = M \omega^2 r$$

式中 a —— 直线加速度;
 $\omega^2 r$ —— 向心加速度;
 ω —— 角速度;
 r —— 质点 对回转轴的距离。

上述三种力的大小与流体质量 M 成正比,并且都作用在质量中心上,因而称为质量力(或体积力)。总的质量力以 F 表示,则单位质量力为 $f = \frac{F}{M}$ 。设 F 在各坐标轴上分力为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力在各个坐标轴上的分力 X 、 Y 、 Z 为

$$X = \frac{F_x}{M} \quad Y = \frac{F_y}{M} \quad Z = \frac{F_z}{M}$$

二、表面力

表面力作用于流体表面上,并与受作用的流体表面积成正比。表面力不仅是作用在流体外表面的力——外力,也包括作用在流体内部任一表面的力——内力。尽管流体内部任一对相互接触的表面上彼此间相互作用的表面力是大小相等,方向相反,相互抵消的。但在流体力学中,常从流体内部取一单元体,这时周围流体对单元体表面上的作用力就是外力。

表面力又可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。设作用在微小面积 A 上的微小压力 P , P 的极限值用 p 表示

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta A}$$

p 表示各点处的压应力,故面上的压力为

$$P = p \cdot A$$

同时在微小面积 ΔA 上,切力 T , $\frac{T}{\Delta A}$ 的极限值用 τ 表示

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{T}{\Delta A}$$

表示各点处切应力,故面上的切力为

$$T = \tau \cdot A$$

从以上分析知道,流体受质量力和表面力二类力作用,在一般运动中,这些力都是存在着的。但是在一些特例中,可能存在其中的某几个。所以正确分析作用在流体上的力,是研究流体平衡和运动规律的基础。

思考题

- 1 - 1 液体与气体有哪些不同性质?
- 1 - 2 何谓连续介质?引入的目的意义何在?
- 1 - 3 密度、重度和相对密度的定义以及它们之间的关系如何?
- 1 - 4 流体的压缩性和膨胀性如何去量度?温度和压力对它们怎样影响?
- 1 - 5 何谓流体的粘性?如何量度流体粘性的大小?液体和气体的粘性有何区别?其原因何在?
- 1 - 6 作用在流体上的力包括哪些力?在何种情况下有惯性力?何种情况下没有摩擦力?

习题

- 1 - 1 轻柴油在温度 15℃ 时相对密度为 0.83,求它的密度和重度。
- 1 - 2 甘油在温度 0℃ 时密度为 1.26g/cm³,求以国际单位表示的密度和重度。
- 1 - 3 水的体积弹性系数为 1.96 × 10⁹ N/m²,问压强改变多少时,它的体积相对压缩 1%?
- 1 - 4 容积 4m³ 的水,温度不变,当压强增加 10⁵ N/m² 时容积减少 1000cm³,求该水的体积压缩系数 β_v 和体积弹性系数 E_v 。
- 1 - 5 用 200L 汽油桶装相对密度为 0.70 的汽油。灌装时液面上压强为 1 个大气压。封闭后由于温度变化升高了 20℃,此时汽油的蒸气压为 0.18 大气压。若汽油的膨胀系数为 0.0006℃⁻¹。弹性系数为 14000kg/cm²。试计算由于压力及温度变化所增减的体积?问灌桶时每桶最多不超过多少公斤为宜?
- 1 - 6 石油相对密度 0.9,粘度 28cP。求运动粘度为多少 m²/s?

1 - 7 相对密度 0.89 的石油, 温度 20 时的运动粘度为 40cSt。求动力粘度为多少?

1 - 8 图示一平板在油面上作水平运动, 已知运动速度 $u = 1 \text{ m/s}$, 板与固定边界的距离 $= 1 \text{ mm}$, 油的动力粘度 $\mu = 1.147 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 由平板所带动的油层的运动速度呈直线分布, 求作用在平板单位面积上的粘性阻力为多少?

题 1 - 8 图

题 1 - 9 图

1 - 9 如图所示活塞油缸, 其直径 $D = 12 \text{ cm}$, 活塞直径 $d = 11.96 \text{ cm}$, 活塞长度 $L = 14 \text{ cm}$, 油的 $\mu = 0.65 \text{ P}$, 当活塞移动速度为 0.5 m/s 时, 试求拉回活塞所需的力 $F = ?$