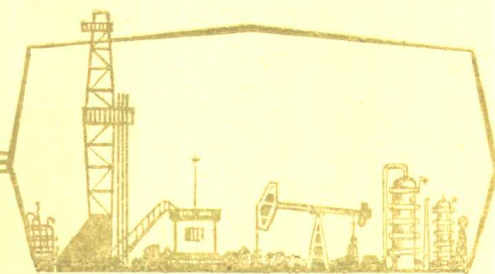


高等学校教学用书

水 力 学

陈 家 琅 主 编



石 油 工 业 出 版 社

水 力 学

陈家琅主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书是按照石油院校钻井和采油工程专业的水力学教学大纲要求和多年教学实践经验编写的。内容包括普通水力学,非牛顿液体的流动和油、气、水混合物多相流动三个部分,共分十章,为了教学的需要每章附有习题和思考题。

本书可作为高等学校有关专业的教科书及厂矿有关技术人员的参考书。

水 力 学

陈家琅主编

*

石油工业部教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

化学工业出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本787×1092 1/16 印张12 1/2 字数 310千字 印15,001—20,500

1980年12月北京第1版 1984年4月北京第2次印刷

书号: 15037·2256 定价: 1.35元

编 者 的 话

本书是为了石油院校钻井工程和采油工程专业的教学需要而编写的。

根据石油工业发展的需要，本书的内容包括普通水力学、非牛顿液体的流动和油、气、水混合物的多相流动。为了教学的需要，在每章的末了附有思考题和习题，可供参考。

本书是按照教学大纲的要求，由华东、西南、大庆三所石油学院水力学教研室的部分教师联合编写的。各部分的编写人如下，绪言：袁恩熙；第一至三章：许震芳；第四、六章：唐永洁；第五章：黄逸仁；第七至十章：陈家琅。全书由陈家琅主编，由袁恩熙主审。

由于我们水平有限，加之时间仓促，书中的缺点和错误在所难免，希望读者指正，以便进一步修改。

目 录

绪言	1
§ 0-1 水力学的研究对象及其发展简史	1
§ 0-2 水力学在石油工业中的作用	2
第一章 流体及其主要的物理性质	3
§ 1-1 流体的概念	3
§ 1-2 密度、重度和比重	3
§ 1-3 压缩性和膨胀性	4
§ 1-4 粘滞性	5
§ 1-5 表面张力	8
§ 1-6 作用在流体上的力	9
第二章 液体静止的基本原理	12
§ 2-1 水静压强及其特性	12
§ 2-2 液体平衡的微分方程式	14
§ 2-3 绝对静止液体	16
§ 2-4 相对静止液体	24
§ 2-5 平面上的液体总压力	26
§ 2-6 曲线上的液体总压力	29
§ 2-7 液体的浮力	32
第三章 液体流动的基本原理	37
§ 3-1 液体流动的基本概念	37
§ 3-2 连续性方程式	40
§ 3-3 理想液体运动的微分方程式	43
§ 3-4 理想液体的伯努利方程式	44
§ 3-5 实际液体总流的伯努利方程式	50
§ 3-6 液流能量的增加和泵的功率	58
§ 3-7 管内流量的量测	60
§ 3-8 不稳定流的伯努利方程式	67
§ 3-9 气穴现象	70
第四章 液流阻力和水头损失	76
§ 4-1 因次分析	76
§ 4-2 液流的相似原理	79
§ 4-3 水头损失的分类	82
§ 4-4 两种流动状态	83
§ 4-5 圆管中的层流运动	85
§ 4-6 圆管中的紊流运动	88
§ 4-7 非圆管液流的沿程水头损失	94
§ 4-8 局部水头损失	95

第五章	管路的水力计算	107
§ 5-1	简单长管的水力计算	107
§ 5-2	串联管路和并联管路	110
§ 5-3	分支管路	112
§ 5-4	短管的水力计算	114
§ 5-5	管路中的水击现象	116
第六章	孔口和管嘴的水力计算、射流	124
§ 6-1	定水头下薄壁圆形小孔口的出流	124
§ 6-2	变水头下薄壁小孔口的出流	126
§ 6-3	管嘴出流	128
§ 6-4	射流	131
§ 6-5	射流的动力性能	132
第七章	非牛顿液体的流动	140
§ 7-1	非牛顿液体的流变性和分类	140
§ 7-2	塑性液体	141
§ 7-3	拟塑性液体和膨胀液体	153
第八章	油、气、水混合物在垂直管中的多相流动	163
§ 8-1	流动型态	163
§ 8-2	平均流速和重度	164
§ 8-3	能量平衡方程式和水头损失	168
§ 8-4	压强梯度	170
第九章	油、气、水混合物在水平管中的多相流动	172
§ 9-1	流动型态	172
§ 9-2	均匀混掺下油气混输管路的计算	173
§ 9-3	均匀混掺下油气混输管路的简化计算公式	177
§ 9-4	按照气液两相流中单相流体的流动状态分类, 计算压降的方法	178
§ 9-5	按照不同的流动型态计算压降的方法	181
第十章	油、气、水混合物流过油嘴的多相流动	184
§ 10-1	压强的传播速度——音速	184
§ 10-2	油、气、水混合物流过油嘴的水力分析	187

绪 言

§ 0-1 水力学的研究对象及其发展简史

水力学 (hydraulics) 是力学的一个分支, 它研究液体 (包括部分气体) 的平衡和运动的规律, 以及液体与固体的相互作用的力学特点, 用以解决工程中的实际问题。

从学科上来看, 属于这一范畴的有理论流体力学、工程流体力学和水力学。流体力学 (fluid mechanics) 着眼于使用数学分析的方法进行理论探讨; 水力学着眼于根据物理分析及实验方法进行实用计算; 而工程流体力学则趋于两者的相互结合, 从实用的观点, 对工程实际中的问题建立相应的理论基础。

本教材针对采油和钻井工程中所涉及的流体 (液体及部分气体) 的力学基本规律, 从理论上作必要的论述, 并结合工程实际列举例题和安排习题, 以提高学生分析问题和解决问题的能力。

许多自然科学来源于物理学。因此, 研究水力学必须以物理为基础, 数学为工具, 力学为依据, 在观察现象及实践验证的基础上, 根据受力状况, 分析流体的运动, 作出符合实际的结论。

研究液体通常以水为代表, 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, 兴水利, 除水害。相传我国古代禹疏九河, 对防洪排涝, 发展农业作出了贡献。春秋时代都江堰工程, 隋代的大运河工程, 以及航运中风帆的利用, 都有力地说明了我们祖先对水流运动的规律已经有了一定的了解。水能利用方面, 早在公元500年左右崔亮发明了“连二水磨”和“连三水磨”; 东汉时期杜诗做“水排”, 用水轮的动力鼓风化铁; 同时期毕岚发明了脚踏水车; 唐宋时期又出现了水力水车, 这已是自动化水泵的雏形。其他如我国古代计时用的“铜壶滴漏”, 就是利用了水的浮力和孔口泄流的原理; 进而汉代张衡创造了水力带动天象仪旋转的浑天仪。但是由于长期封建统治, 生产力得不到发展, 因而我们祖先在有关水力学的理论和实践知识方面, 也只能停留在低级阶段, 没有形成完整的系统理论。

在西方也和我国一样, 公元数百年前, 就已出现水压机、消防唧筒等。公元前250年阿基米德 (Archimedes) 提出了最早的一篇论文“论浮体”, 促进了航海事业的发展。以后也由于封建统治的束缚, 水力学象其他科学一样, 没有什么重大进展。直到16、17世纪, 由于生产上的需要, 托里拆利 (Torricelli, 1643年) 提出孔口泄流原理, 巴斯加 (Pascal, 1650年) 提出压强传递定律, 牛顿 (Newton, 1686年) 提出液体内摩擦定律等等, 但也只限于解决个别的局部问题。18世纪英国出现了大规模的产业革命, 生产力大幅度上升, 水力学和流体力学伴随着其他科学一起有了较大的发展。如伯努利 (Bernoulli) 能量平衡方程式、欧拉 (Euler) 平衡和运动微分方程式, 为流体流动建立了普遍的规律, 使之有了较完整的理论基础。19世纪, 这些理论得到了进一步发展, 形成了粘性流体力学理论和漩涡理论。在实验方面, 雷诺 (Reynolds)、达西 (Darcy) 等对水流阻力进行了大量的分析研究, 至今仍被广泛应用。20世纪以来, 生产力得到了进一步的提高, 尤其是航空事业的发展, 促进了工程

流体力学的飞速进步。

§ 0-2 水力学在石油工业中的作用

石油是流体的一种。油、气、水这些流体，包括钻井用的泥浆，采油用的压裂液、降粘液以及改善钻采效果所使用的各种流体等，其性质有的与水相近，有的在一定范围内又有其特殊性。

随着石油工业的发展，水力学的原理被广泛地应用于石油工业。从石油和天然气的调查、勘探、钻井、采油，直到炼成成品，运输到使用油料的单位，都离不开和石油、水、泥浆、水泥浆、各种气体和溶液等接触。在钻井工作中，有泥浆循环和注水泥操作等；在采油工作中，有油、气从井筒上升到地面井口，然后经过收集、计量、初步处理、贮存、运输，再送往集油总站等。在这些过程中，经常都涉及到水力学的问题。此外，水力学还为油田地下渗流力学和有关专业的学习打下一定的基础。因此，从事钻井和采油的石油工作者，有必要掌握一定的水力学知识，了解流体的性质、平衡和运动的规律，以便更好地运用这些规律进行工艺设计和计算，分析生产中出现的問題，采取合理的有效措施，以提高生产能力，为中国革命和世界革命作出更大的贡献。

第一章 流体及其主要的物理性质

流体在各种不同水力现象中的表现，都与它的物理性质有关，因而在讨论流体的力学规律以前，有必要先了解一下流体的概念、流体的物理性质和作用在流体上的力。

§ 1-1 流体的概念

流体包括液体和气体，它们和固体的最显著区别就在于具有连续流动的性质，只要受很小的力，就会改变形状，放在什么样的容器里就成什么形状。这是由于流体内部的分子引力远小于固体的缘故。拿液体和气体来比较，气体形状就更不固定。液体能放在开口容器里形成与大气的明显分界面（这个分界面一般叫做自由面），而气体则只能被限制在密闭的容器中，如果容器有漏洞，它就会和四周的大气混合在一起，而不能贮存。这种现象是气体和液体的一个重要区别。

液体和气体的另一个显著的区别表现在它们的可压缩性方面，气体分子排列松散，分子力比较弱，在较小的外力作用下，其体积有明显的变化，因而通常称为可压缩流体（compressible fluid）。液体分子排列比较紧密，分子力比较强（相对于气体而言），在极大的外力作用下其体积才可能发生极微小的变化，一般在3000个大气压的范围内，每增加一个大气压，一般液体的体积只缩小十万分之几。因而通常把液体称为不可压缩流体（incompressible fluid）。在某些特殊情况下，液体的压缩性又是不可忽视的，如管路中液体运动速度发生急剧变化时（一般由于阀门开启或关闭太快所引起），会发生由于液流惯性引起的“水击”现象，造成压强的突然变化，发生强烈的震动，使管路破坏，这时就必须考虑到液体的压缩性来计算水击压强的大小。

从以上分析可以看出，液体与气体有共同的地方，那就是它们都没有一定的形状，具有流动性；液体与气体亦有不同的地方，那就是液体几乎不可压缩。

从物理概念来观察，流体是由大量分子组成的，显然分子之间有一定的间隙。为了研究方便，在水力学中假定流体不是由分子组成，而是由无限多微小质点所组成的连续介质。其中，每个微小质点是由许多分子组成的分子团。流体既然是由连续分布着的质点所组成，因而其状态参数（如密度、压强、速度等）就都是空间座标的连续函数。这样一来，在以后的讨论中就可以引用连续函数的解析研究方法，处理流体在平衡和运动状态下的状态参数问题。

§ 1-2 密度、重度和比重

流体具有质量，它可以用密度（density）来度量。对于均质流体来说，单位体积内所含有的质量叫做密度，用 ρ 表示。如果体积为 V 的流体具有质量 M ，则它的密度为

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

按力学中牛顿第二定律 $F = Ma$ 的关系来看，在工程单位制中，质量 M 的单位是公斤·秒²/

米，因而密度 ρ 的单位是公斤·秒²/米⁴。

同时，流体具有重量，它可以用重度 (specific weight) 来度量。对于均质流体来说，单位体积内所含有的重量叫做重度，用 γ 表示。如果体积为 V 的流体具有重量 G ，则它的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

在工程单位制中，重度的单位是公斤/米³。

密度和重度之间有一个简单的关系式。因为重量 G 等于质量 M 与重力加速度 g 的乘积，即

$$G = Mg$$

将两边同除以体积 V 后，则得

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中重力加速度 g 在工程单位制中其数值为 9.80 米/秒²。

再说明一下比重 (specific gravity) 这个概念。液体的比重是指液体的重量与同体积的温度为 4℃ 时蒸馏水的重量之比。为什么选择 4℃ 呢？这是由于蒸馏水在 4℃ 时密度最大，此时它的重度是 1000 公斤/米³。比重是一个比值，是个无因次数。

比重一般用 δ 表示。就液体来说，它与重度或密度有以下关系

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

而气体的比重是指在同样的压强和温度条件下，气体的重度与空气的重度之比。

表 1-1 某些常见液体的比重数值

流 体	比 重	温度, ℃	流 体	比 重	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	甘 油	1.26	0
航空煤油	0.78	15	水 银	13.6	0
普通汽油	0.70~0.75	15	酒 精	0.79~0.80	15

§ 1-3 压缩性和膨胀性

流体的压缩性是指流体在压强作用下体积缩小的性质。压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 表示，它代表压强增大一个大气压 (1 大气压 = 1 公斤/厘米²) 时流体体积相对缩小的数值，可以用公式表示成

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

式中 β_p ——体积压缩系数, 1/大气压;

V ——流体体积, 米³;

p ——压强, 大气压。

因为 dV 与 dp 的变化方向相反, 压强增加时体积减少, 而为了使 β_p 为正值, 所以式中加一负号。

液体的压缩性很小, 例如就水的体积压缩系数来说, 当压强由 1 到 500 大气压时, 其平均值 $\beta_p = 47.5 \times 10^{-6}$ 厘米²/公斤; 由 1000 到 1500 大气压时, 其平均值 $\beta_p = 35.8 \times 10^{-6}$ 厘米²/公斤; 由 2500 到 3000 大气压时, 其平均值 $\beta_p = 26.1 \times 10^{-6}$ 厘米²/公斤。故实际上往往把液体看成是不可压缩的。

体积压缩系数的倒数叫做体积弹性系数, 用 E_0 表示。

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-6)$$

其单位为大气压。

不同温度和压强下, 水的体积弹性系数如表 1-2 所示。

表 1-2 水的体积弹性系数值

温度 t , °C	压 强 p , 大 气 压				
	5	10	20	40	80
0	18900	19000	19200	19500	19800
5	19300	19500	19700	20100	20700
10	19500	19700	20100	20500	21200
15	19700	20000	20300	20900	21700
20	19800	20200	20700	21200	22170

当温度及压强增高时, 液体的压缩性将略为减小, 例如温度达 100°C, 压强达 500 大气压时, 水的体积弹性系数约增为 25000 大气压。

当温度每增高 1°C 时, 流体体积相对增大的数值叫做体积膨胀系数, 用 β_t 表示。

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

式中 β_t ——体积膨胀系数, 1/°C;

V ——流体体积, 米³;

t ——温度, °C。

表 1-3 中给出水的体积膨胀系数随压强和温度而变化的数值。

从数值上来看, 水的压缩性及膨胀性都是很小的。所以在压强及温度变化不大时, 可以认为液体既不可压缩又不能膨胀。在此前提下, 可以认为液体的重度和密度是不随温度和压强而改变的。

§ 1-4 粘 滞 性

关于液体的粘滞性 (viscosity), 今以管内的液流为例来说明。液体在管内流动时, 由

表 1-3 水的体积膨胀系数值

压强p, 大气压	温度t, °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

于液体和固体界壁的附着力及液体本身的内聚力,使管内液体各处的速度产生差异。紧贴管

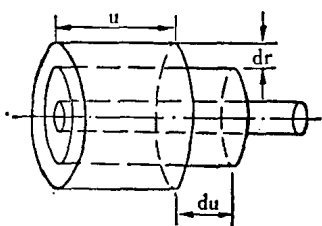


图 1-1 圆管内的速度分布状况

壁处液体附着在管壁上,速度为零;越接近管轴,速度越大;轴心处速度最大。垂直于管轴断面上各点的速度是按一定的曲线分布的。如果液体质点都沿着轴向运动,可以把管中液体流动看成是许多无限薄的圆筒形液层的运动,如图 1-1 所示。运动较快的液层带动运动较慢的液层;反之运动较慢的液层又阻滞运动较快的液层。这样,当快的液层在慢的液层上滑过时,在液体层与层之间产生内摩擦力或切应力,这种性质就表现为粘滞性。

如图1-1,取两个相邻无限近的液层,其距离为 dr ,两层液体的速度相差一个微小值 du 。 $\frac{du}{dr}$

称为速度梯度 (velocity gradient)。根据牛顿的研究结果,液体层间的内摩擦力与液体的速度梯度成正比,与接触面积成正比,与液体的种类及其温度有关,而与压强无关。可以将其写成如下的关系式,称为牛顿内摩擦定律。

$$T = -\mu A \frac{du}{dr} \quad (1-8)$$

式中 T ——内摩擦力;

A ——接触面积;

$\frac{du}{dr}$ ——速度梯度;

μ ——表征流体粘滞性的一个比例常数,叫做动力粘滞系数 (coefficient of dynamic viscosity),简称粘滞系数或粘度。

管流中 $\frac{du}{dr}$ 为负值,为了保持 T 永为正值,故式(1-8)中取“-”号。

凡是粘滞性符合牛顿内摩擦定律的液体,统称为牛顿液体 (Newtonian fluid)。

内摩擦力 T 如果除以接触面积 A ,即得切应力 τ ,故

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

从式(1-8)或(1-9)可知,当 $\frac{du}{dr} = 0$ 时

$$T = 0; \quad \tau = 0$$

所谓 $\frac{du}{dr}=0$, 也就是说流体呈绝对静止或者呈相对静止 (即液体质点间没有相对运动)。因此在此静止 (包括绝对静止及相对静止) 状态的流体中, 不出现内摩擦力或切应力。

关于动力粘滞系数 μ 的物理意义, 从式 (1-9) 舍去 “-” 号可得

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}}$$

由此可见, μ 的物理意义是指当速度梯度等于1时, 两个接触的液层间单位面积上的内摩擦力。

在工程单位制中, 牛顿内摩擦定律 (1-9) 中 τ 的单位是 公斤/米², 而 $\frac{du}{dr}$ 的单位是 1/秒, 故 μ 的单位为 公斤·秒/米²。

在物理单位制中, μ 的单位为 达因·秒/厘米², 称为 “泊” (poise)。

$$1 \text{ 泊} = 1 \text{ 达因} \cdot \text{秒} / \text{厘米}^2$$

因为 1 公斤 = 980000 达因, 1 米 = 100 厘米, 故工程单位制和物理单位制的 μ 值可以用下列公式互相换算

$$\begin{aligned} 1 \text{ 泊} &= 1 \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} = \frac{1}{980000} \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\left(\frac{1}{100} \text{米}\right)^2} = \frac{1}{98} \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \\ &= 0.0102 \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2} \end{aligned}$$

$$1 \text{ 公斤} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 = 98 \text{ 泊}$$

因为泊的单位有时用之过大, 常用泊的百分之一来表示, 叫做厘泊 (centipoise)。

$$1 \text{ 泊} = 100 \text{ 厘泊}$$

在水力计算中, 也常使用动力粘滞系数 μ 与液体密度 ρ 的比, 它叫做运动粘滞系数 (coefficient of kinematic viscosity), 用 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

在工程单位制中, μ 的单位是 $\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$, ρ 的单位是 $\frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$, 所以 ν 的单位是 米²/秒;

在物理单位制中, μ 的单位是 $\frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} = \left(\frac{\text{克} \cdot \text{厘米}}{\text{秒}^2}\right) \cdot \text{秒} / \text{厘米}^2 = \frac{\text{克}}{\text{厘米} \cdot \text{秒}}$, ρ 的单位是 克/厘米³, 所以 ν 的单位是 厘米²/秒, 也叫做沱 (stoke)。沱的百分之一称为厘沱 (centi-stoke),

$$1 \text{ 沱} = 100 \text{ 厘沱}$$

运动粘滞系数的工程单位和物理单位的换算关系是

$$1 \text{ 米}^2 / \text{秒} = 10^4 \text{ 厘米}^2 / \text{秒} = 10^4 \text{ 沱}$$

对于一般液体来说, 温度越高, 粘滞性越小, 也就是越容易流动; 而对于气体来说, 温度越高, 粘滞性反而增大, 这是因为温度高时气体的分子运动更加活跃, 从而增加了流动阻力。压强对于粘滞性的影响, 对液体是不明显的; 对气体来说, 由于压强的增大会使气体的

密度增大，从而增大了粘滞性。

表1-4给出了水在不同温度下的动力粘滞系数和运动粘滞系数值。

表 1-4 水的动力粘滞系数和运动粘滞系数值

温度 $t, ^\circ\text{C}$	动力粘滞系数	运动粘滞系数
	$\mu, 10^{-7}\text{公斤}\cdot\text{秒}/\text{米}^2$	$\nu, 10^{-6}\text{米}^2/\text{秒}$
0	182.5	1.790
10	133.0	1.300
20	102.0	1.000
30	81.7	0.805
40	66.6	0.659
50	56.0	0.556
60	48.0	0.479
70	41.4	0.415
80	36.3	0.366
90	32.1	0.326
100	28.8	0.295

实际流体都是有粘滞性的，因此在流体运动时，都会产生内摩擦力，这样就给以后研究流体的流动问题带来很大麻烦。因此，在水力学中假定了一种所谓理想液体，它不具有粘滞性，因而它是在运动时不产生内摩擦力的一种假想液体。在研究液体流动问题时，可以首先研究简化了的理想液体，待得出某些结果后，再考虑实际液体的粘滞性，将上述结果进行相应的修正。

此外必须指出，上述牛顿液体内摩擦定律，对于诸如含胶质或沥青质很多的原油、钻井用的泥浆等，是不适用的，这些液体称为非牛顿液体 (non-Newtonian fluid)，其规律将在第七章讨论。

§ 1-5 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。但是在液体与大气形成的自由分界面上，会形成一种表面张力 (surface tension)。这是因为气体的分子内聚力和液体的分子内聚力有显著的差别，使液面上的液体分子有向液体内部收缩的倾向。如果没有器壁限制，则液面将形成球面的一部分，如图1-2中n-n所示。沿球面具有拉紧作用的力 σ ，叫作表面张力。表面张力的大小，以作用在单位长度上的力来量度。

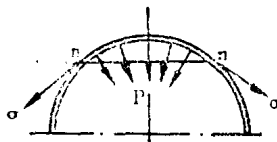


图 1-2 表面张力

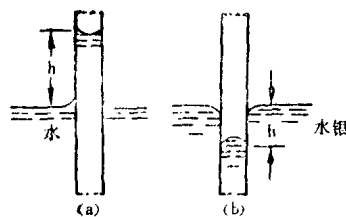


图 1-3 毛细管现象

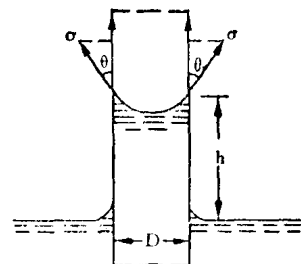


图 1-4 毛细管中液柱升高的分析

表 1-5 几种液体的表面张力数值

液 体 名 称	水	水 银	酒 精	甘 油
表面张力 σ , 公斤/厘米	0.000074	0.000550	0.000022	0.000065

从表1-5可以看出, 表面张力值是很小的, 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或下降, 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。

当玻璃管插入水(或其它能够润湿管壁的液体)中时, 其液面上升如图1-3(a)所示。当玻璃管插入水银(或其它不能润湿管壁的液体)中时, 其液面下降如图1-3(b)所示。

现在以水为例, 推导毛细管中液面升高的数值。

如图1-4, 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

$$\pi D \sigma \cos \theta$$

其方向向上。

上升的液柱重量为

$$\gamma \frac{\pi}{4} D^2 h$$

其方向向下。

由以上两式可得

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

所以

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\gamma D} \quad (1-11)$$

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 $\theta=8\sim 9^\circ$, 水银与玻璃的接触角 $\theta=139^\circ$, 考虑到水与水银的 σ 及 γ 值后, 即可得出20℃时水在玻璃毛细管中上升的高度为 $h = \frac{29.8}{D}$ 毫米; 水银在玻璃毛细管中下降的高度

为 $h = \frac{10.15}{D}$ 毫米, 式中D的单位为毫米。

§ 1-6 作用在流体上的力

在讨论流体的平衡和运动规律之前, 需要根据上述的流体概念及物理性质来分析一下作用在流体上的力。

从密度为 ρ 的运动流体中取出被某一面积A所包围的一块体积V作为分离体, 见图1-5。该体积内部各分子之间的引力是内力, 互相平衡, 将不予讨论。

由于流体具有质量 $M(M=\rho V)$ ，故必有在运动时作为达兰贝尔 (D'Alembert) 力而加入的直线惯性力 I

$$I = Ma$$

以及离心惯性力 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。

由于流体具有重量，故必受有重力 G

$$G = Mg$$

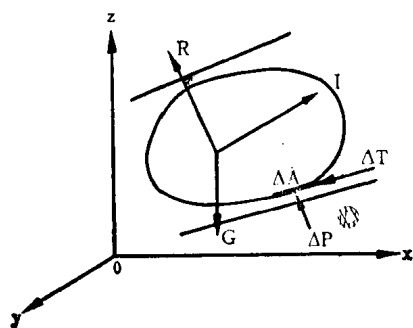


图 1-5 作用在流体上的力

式中 g ——重力加速度。

在分离体的周围表面上，受有与之相邻的流体对它作用的压力 P 。在图1-5中仅绘出了作用在微小面积 ΔA 上的微小压力 ΔP ， $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限值用 P 表示（详见第二章 § 2-1），代表面上各点处的压强；故面上的总压力 $P = pA$ 。同时，在微小面积 ΔA 上，还受有由于流体的粘滞性引起的内摩擦力 ΔT ，单位面积上的内摩擦力由 § 1-4 知可用 τ 表示；故全表面 A 上的总摩擦力将为 $T = \tau A$ （由于所取体积 V 极小， P 和 τ 均视为平均值）。

上述五种外力，归纳起来可以分为两类：前三种力（直线惯性力、离心惯性力及重力）的大小与流体的质量（或体积）有关，并且都作用在流体的质量中心上，因而叫做质量力或体积力。后两种力（压力及摩擦力）的大小与流体的表面积大小有关，并且都按照一定的分布规律作用在流体表面上，因而叫做表面力。

这样，可以说流体受两类外力的作用：质量力和表面力。这些外力在一般运动中都是存在着的。但是在一些特例中，可能只存在其中的某几个。例如在绝对静止时没有摩擦力和惯性力，在直线加速运动时没有离心惯性力等等。

思 考 题

1. 液体具有哪些特点？
2. 密度、重度和比重的定义以及它们之间的关系如何？
3. 怎样度量流体压缩性的大小？体积弹性系数和体积压缩系数是什么关系？
4. 什么叫流体的粘滞性？是怎样体现的？又怎样度量粘滞性的大小？
5. 动力粘滞系数和运动粘滞系数有什么区别？它们的常用单位是什么？怎样进行换算？动力粘滞系数的物理意义是什么？
6. 液体表面张力是怎样产生的？在水力学上有什么重要意义？
7. 作用在流体上的力有几种？各有何特点？

习 题

习题1-1. 今有比重0.65的航空汽油，试求出以工程单位制表示的密度。

(66.3公斤·秒²/米⁴)

习题1-2. 已知石油的重量为324吨，它的密度为91.8公斤·秒²/米⁴，试计算其体积。

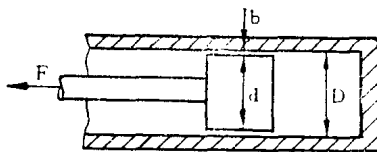
(360米³)

习题1-3. 甘油在0℃时的密度为1.26克(质量)/厘米³, 试求以工程单位制表示的密度和重度。
(128.6公斤·秒²/米⁴, 1260公斤/米³)

习题1-4. 用200升汽油桶装比重0.70的汽油。灌装时液面上压强为1个大气压。封闭后, 由于温度升高320℃, 其汽油液面的压强增大了0.18大气压。汽油的体积膨胀系数为0.0006 1/℃, 体积弹性系数为14000公斤/厘米²。试计算由于压强及温度变化所增减的体积? 问灌桶时以最多每桶不超过若干公斤为宜?

(-2.57 × 10⁻³升; 2.4升; 138公斤)

习题1-5. 如图所示的活塞油缸中, 油缸直径D=12厘米, 活塞直径d=11.96厘米, 活塞长度L=14厘米, 间隙中充以μ=0.65泊的油液。如果加在活塞上的力F=0.86公斤, 试求活塞的移动速度u为若干?
(0.493米/秒)



题 1-5图

习题1-6. 温度20℃时水的比重为0.9982, 动力粘滞系数为1.005厘泊, 求运动粘滞系数为若干厘沱?
(1.01厘沱)

习题1-7. 比重为0.89的石油, 在温度20℃时的运动粘滞系数为4厘沱, 求以工程单位制表示的动力粘滞系数为若干?
(3.63 × 10⁻⁴公斤·秒/米²)

习题1-8. 今在贮水容器上, 用直径10毫米和5毫米的玻璃管作为液面计。试求因毛细管作用可能引起的误差各为多少毫米。
(2.98毫米; 5.96毫米)