

适用环境工程及给排水专业


· 高等职业教育教材 ·

环境工程基础

(流体力学·流体机械·化工原理基础)

· 邓爱华 编著 ·



 中国轻工业出版社

适用环境工程及给排水专业

高等职业教育教材

环境工程基础

(流体力学·流体机械·化工原理基础)

邓爱华 编著

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程基础/邓爱华编著. —北京: 中国轻工业出版社, 2003.8

高等职业教育教材

ISBN 7-5019-3959-4

I. 环… II. 邓… III. 环境工程-高等学校: 技术学校-教材 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 026412 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 李建华 陈耀祖 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 李云飞

版式设计: 郭文慧 责任校对: 郎静瀛 责任监印: 吴京一

*

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

发行电话: 010—65121390

印 刷: 北京工大印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 20

字 数: 351 千字 印数: 1—3000

书 号: ISBN 7-5019-3959-4/X·013

定 价: 36.00 元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

30179J1X101ZBW

中国轻工业出版社读者服务部电话: 010—65241695 传真: 010—85111730

前 言

高职教育的教育模式是以岗位能力培养为主线，对基础理论以够用为准，因此与同类本科及老“大专”相比，高职类各专业的教学计划表现出三大特点：一是课程整合力度较大，二是专业基础课学时大大压缩，三是课内外实训（包括实验、实操、实习和课程设计等）比例大幅度增加。进而带来了现有教材与课程教学要求的不适应性，而且这一矛盾越来越突出。

本教材正是基于高职院校环境工程专业和给水排水专业已基本将《流体力学》（或《水力学》）与《水泵及水泵站》整合为一门课的现实，按授课学时为 90 学时编写的。同时照顾到环境工程专业需求，还增加了必要的《化工原理》的基础内容。

本教材在编写过程中遵循以下原则：

- ①与高职教育教学模式、大纲要求及教学方法高度统一；
- ②遵循理论知识“够用为度”，突出职业技能和创造力的培养；
- ③符合认识规律，注重知识更新；
- ④文字精炼，通顺易懂，篇幅适当；
- ⑤具有通用性，适合多种办学形式，并便于自学。

本教材具有以下特点：

①在结构上，突出“职业性、实用性、适用性”特色。改变了原有教材以“学科体系”为准的编排结构，突破以概念、定理等理论知识为线索的体系，采取从感性认识入手上升到理性定量认识的“双循环”结构，突出实际应用能力的培养。在教材风格上形成“实践——理论——实践”的鲜明特色。

②在内容上，有增有减，体现以能力培养为中心，理论知识和技能操作并重。理论知识本着以“够用为度”的原则，适当删减，降低难度，大篇幅增加实践应用知识和操作技能的训导，着重和突出工程能力、创新能力、应变能力和职业道德培养。

③在内容编排和叙述思路上，具有思想性、系统性和启发性，并符合初学者的认识规律，有利于教师讲解，学生自学。叙述从感性认识或实际例子入手，先提出问题，再去寻找解决问题的方法，即上升到理论知识，最后由理论解决实际问题，这即为前面所述的“双循环”过程。尽量避免采用枯燥死板的固定叙述模式，以增加知识的实用性来提高学生学习兴趣。

④在叙述语言上，尽量增加生动性和趣味性，注意用生活实例或比拟手法，以浅显易懂的语言解释较深奥的定理定律，避免由于前续基础课知识的欠缺造成学习上的困难。

⑤在实例和习题选材上，注意结合专业实际，并注意引入新知识、新技术，提高新知识的含量。

⑥在实际技能和工程应用内容上，注意符合最新行业标准和规范要求，并着重引导学生勤于思考，开拓思路，培养创新能力。

本教材共分四篇，即流体力学基础（共 5 章）、流体机械与泵站（共 4 章）、化工原理基础（共 3 章）和实验与实训（共包括 12 个流体力学实验及 6 个水泵及泵站实训项目）。

本教材由深圳职业技术学院邓爱华副教授担任主编。王淑芳同志编写了第 10、11、12 三章内容，其余均由邓爱华副教授编写。全书由武汉大学姚凯文副教授（博士）担任主审。

本教材作为高等职业技术系列教材之一，适用于高职院校环境工程专业、给排水专业及其他相近专业教学，也可作为以上专业本科学生及教师的参考用书。

限于编者水平，教材中难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编者

2003 年 3 月

目 录

第 1 篇 流体力学基础

第 1 章 流体基础知识	(1)
1.1 流体及流体力学	(1)
1.2 流体的主要物理力学性质	(2)
1.3 作用在流体上的力	(10)
1.4 流体的力学模型	(11)
第 2 章 流体静力学	(13)
2.1 流体静压强及其特性	(13)
2.2 重力作用下的流体静压强分布	(15)
2.3 平面上的流体总压力计算	(24)
2.4 曲面上的流体总压力计算	(28)
2.5 流体的相对平衡	(31)
第 3 章 流体动力学	(34)
3.1 流体运动的描述方法	(34)
3.2 流场基本概念	(35)
3.3 流体运动质量守恒方程——恒定流连续性方程	(37)
3.4 恒定流能量方程——伯努利方程	(39)
3.5 实际流体恒定总流的动量方程	(48)
3.6 恒定流动量矩方程简介	(52)
第 4 章 流动形态与水头损失	(55)
4.1 流动阻力与水头损失	(55)
4.2 两种流动形态——层流与紊流	(56)
4.3 均匀流沿程损失	(59)
4.4 圆管层流的沿程损失	(60)
4.5 紊流流动特征	(62)
4.6 紊流的沿程损失	(66)
4.7 局部水头损失	(73)
4.8 绕流阻力与升力	(78)
第 5 章 工程中常见的各类流动	(79)
5.1 孔口出流	(79)
5.2 管嘴出流	(82)
5.3 有压管流	(85)
5.4 明渠均匀流	(98)

5.5 堰流	(104)
5.6 渗流	(108)

第 2 篇 流体机械与泵站

第 6 章 水泵基础知识与基本理论	(114)
6.1 概述	(114)
6.2 离心泵工作原理与基本构造	(116)
6.3 三种离心泵的构造与性能特点	(121)
6.4 离心泵性能参数与特性曲线	(124)
6.5 离心泵叶轮相似律与相似准数	(128)
6.6 离心泵吸水性能与安装高度	(131)
6.7 其它常用水泵	(138)
第 7 章 离心泵运行工况与调节	(145)
7.1 离心泵装置及总扬程	(145)
7.2 离心泵定速运行工况	(149)
7.3 离心泵并联与串联运行	(153)
7.4 离心泵工况点调节	(158)
7.5 离心泵机组的使用与维护	(168)
第 8 章 泵站基础知识	(171)
8.1 给水泵站分类与特点	(171)
8.2 水泵选择	(173)
8.3 泵房及管路布置	(181)
8.4 泵站水锤及其防护	(186)
8.5 泵站噪声及防治	(191)
8.6 泵站辅助设备与布置	(192)
8.7 排水泵站简介	(195)
8.8 风机	(202)

第 3 篇 化工原理基础

第 9 章 沉降与过滤	(204)
9.1 沉降	(204)
9.2 过滤	(206)
第 10 章 传热与干燥	(214)
10.1 传热	(214)
10.2 干燥	(233)
第 11 章 气体吸收	(239)
11.1 吸收基础理论	(239)
11.2 气液相平衡	(242)
11.3 传质机理与传质速率	(244)

11.4 吸收塔设备简介	(245)
--------------------	-------

第4篇 实验、实训、习题集

第12章 实验	(249)
12.1 流体密度测定	(249)
12.2 流体黏性演示实验	(251)
12.3 静水压强及真空量测	(252)
12.4 能量方程及文丘里流量计率定实验	(254)
12.5 动量方程实验	(256)
12.6 雷诺实验	(258)
12.7 有压管道沿程及局部水头损失实验	(261)
12.8 管道水击现象综合演示实验	(265)
12.9 离心泵性能曲线测定	(267)
第13章 实训	(270)
13.1 离心泵构造与抽水装置组成认识	(270)
13.2 离心泵机组安装与检修实训	(271)
13.3 离心泵装置安装与运行实训	(272)
13.4 泵站机组布置与辅助设备认识	(273)
13.5 水泵选型及机组布置设计实训	(274)
13.6 给水泵站工艺流程与运行管理认识	(275)
13.7 排水泵站工艺流程与运行管理认识	(277)
第14章 习题	(278)
14.1 流体基础知识习题	(278)
14.2 流体静力学习题	(279)
14.3 流体动力学习题	(286)
14.4 流动形态与水头损失习题	(293)
14.5 工程中常见的流动现象习题	(297)
14.6 水泵基础知识与基本理论习题	(301)
14.7 离心泵运行工况与调节习题	(305)
14.8 泵站基础知识习题	(307)
14.9 沉降与过滤习题	(308)
14.10 传热与干燥习题	(309)
14.11 气体吸收习题	(311)
参考文献	(312)

第 1 篇 流体力学基础

流体是人类生活和生产中经常遇到的物质形式，是自然界中除固体外物质的另一种存在形式，它包括以水为代表的一切液体和以空气为代表的所有气体。

流体力学是以理论分析和实验相结合的方法，研究流体平衡及运动规律，以及这些规律在工程中的应用的一门学科。

本篇分 5 章内容。前 4 章从生活和生产实例入手，首先介绍流体主要力学性质，处于静止和相对平衡状态时的力学规律及工程应用，然后进一步研究流体运动的基本规律和特点，进而介绍流体运动阻力和损失计算。第 5 章则简要介绍几种常见的流动现象的特征和水力计算方法。

本篇内容是环境工程专业多门专业课的基础知识。

第 1 章 流体基础知识

在讨论流体的力学规律之前，必须首先明确流体概念和基本特征，并对决定流体平衡和运动规律的内部原因——流体的力学性质进行分析和讨论。本章将在明确流体概念的基础上，主要介绍流体的基本特征、主要物理力学性质、流体运动时作用在流体上的力及研究流体运动规律时常用的三个力学模型。

1.1 流体及流体力学

1.1.1 流体基本特征

【实例 1-1】放在桌面上的一杯水或一碗牛奶具有一定的体积和形状，但当把它们倾倒在桌面上时，它们会立即向四周漫成一滩；一滴黏稠的油漆也会在平板上变得越来越扁平。

【问题】为什么水或牛奶不能像固体那样具有固定不变的体积和形状？

上述实例都说明：流体在任何一个微小的剪切力作用下，甚至仅在重力作用下就会发生连续不断的变形，我们就称流体的这种变形为流动。顾名思义，流体的最基本特征是具有流动性，这种流动性正是流体区别于固体的最基本的特性。因此，凡是在一般情况下不能像固体那样保持一定的形状，而具有流动性的物质，统称为流体。

那么，流体为什么会表现出与固体完全不同的特性呢？

物质的宏观性质与分子结构及分子间的作用力有关。根据物质的分子构成理论，流体和

固体一样，是由具有一定间隙的、运动着的无数分子所构成，但其分子间距比固体大得多，而分子间的相互吸引力却比固体小得多，可以说非常微弱。正因为这种分子结构上的差异，流体表现出与固体完全不同的宏观特征。

1.1.2 流体力学基本任务及应用

流体作为物质的一种基本形态，必然遵守自然界一切物质运动的普遍规律，如牛顿力学三定律、质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律等有关物体宏观运动的一般规律。流体力学是以流体为研究对象，以高等数学连续函数为数学工具，采用理论分析、数值计算和实验研究相结合的方法，来研究流体处于平衡或运动状态时的力学规律及其与边界间的相互作用规律，并着重研究这些规律在工程实践中的应用。流体力学包括液体力学（又称水动力学）和气体力学两部分，水动力学以不可压缩流体为研究对象，既适用于液体，也适用于低速气流，气体力学则必须考虑气体的压缩性。

流体力学基础理论和流体运动规律的应用在环境工程中几乎无处不在：水源取水构筑物、给水处理构筑物、污水处理构筑物、大气监测技术等方面都必须遵循流体运动的一般规律，否则就达不到预期的目的。流体力学不仅是环境工程专业的基础理论，而且在国民经济许多部门中有着广泛的应用。水利行业中所有水工建筑物的设计施工都离不开水动力学；航空工业的飞机制造业离不开空气动力学；电力工业中，无论是水电站、火电站，还是核电站、地热电站，它们的工作介质都是流体；机械工业中的润滑、冷却、液压传动等都要利用流体力学的基本原理；冶金工业中，炉内气体的流动、冷却、通风等过程都存在许多流体力学问题；水利工程中的水资源运用、泄洪消能、河道整治、灌溉排水等工程手段和措施中都利用了许多水动力学原理。此外，化工流程、石油输送、交通运输、造船工业等也必须解决许多流体力学问题。事实上，随着流体力学理论的深入发展和科学技术及经济建设的突飞猛进，流体力学在工程技术范围内的应用越来越广，目前已很难找到与流体力学无关的学科和专业。

流体力学的中心问题有两个：

- (1) 研究流体运动时速度的分布及其变化规律；
- (2) 研究流体静止和运动时对物体的作用力和力矩产生原因、计算方法及影响因素。

1.2 流体的主要物理力学性质

外因是变化的条件，内因是变化的依据。流体在外力作用下是处于平衡还是做机械运动，以及在此过程中所发生的一切现象和表现特征都是由流体自身的物理力学性质决定的。因此，流体的物理力学性质是我们研究流体相对平衡和机械运动的基本出发点。在流体力学中，有关流体的主要物理力学性质有以下几方面。

1.2.1 惯性

在中学物理中大家已经知道，惯性是物体保持其原有运动状态的一种物理特性，要想改变物体的运动状态，首先必须克服惯性的作用。任何物体都具有惯性，流体也不例外。表示物体惯性大小的物理量是质量，物体质量越大，其惯性也越大，运动状态就越难以改变。物体反抗其原有运动状态的改变而作用在其它物体上的反作用力称为惯性力，其数值为

$$F = - ma \quad (1-1)$$

式中 F ——惯性力, N
 m ——物体质量, kg
 a ——加速度, m/s^2

负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反

流体惯性的大小与其质量密切相关, 而质量又与其体积成正比。我们把单位体积内流体的质量定义为该种流体的密度, 用 ρ 表示。流体的种类不同, 密度也不同。各处密度都相同的流体称为均质流体, 反之, 则为非均质流体。若某均质流体体积为 V , 质量为 m , 则其密度

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

对于非均质流体, 可用高等数学中求极限的方法确定空间某点的密度。在该点周围取一微元体积 ΔV , 其质量为 Δm , 则该点的密度为

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

在国际单位制中, 密度的单位是 kg/m^3 。

流体的密度不是一成不变的, 它一般随温度和压强的变化而变化。相比而言, 液体密度随温度和压强的变化甚微, 而气体则较大。在绝大多数实际工程的流体力学问题中, 可近似地认为液体的密度为常数。计算时, 一般采用水的密度为 $1000kg/m^3$ 。

表 1-1 是几种常见流体在标准大气压下的密度, 而不同温度下的水和空气的密度值见表 1-4。

表 1-1 标准大气压下几种流体的密度

流体名称	温度 $t/^\circ C$	密度 $\rho / (kg/m^3)$	流体名称	温度 $t/^\circ C$	密度 $\rho / (kg/m^3)$
水	4	1000	钢	1550	7200
海水	15	1020	空气	0	1.29
水银	0	13600	氧气	0	1.429
酒精	20	789	氢气	0	0.0899
汽油	15	724	一氧化碳	0	1.25
柴油	15	876	二氧化碳	0	1.976

1.2.2 万有引力特性

物体之间具有相互吸引的性质, 这就是物理学中的万有引力特性, 这个吸引力称为万有引力。在流体运动中, 一般只考虑地球对流体的引力, 即重力 (又称重量), 用 G 表示, 有

$$G = mg \quad (1-4)$$

式中 G ——流体体积 V 时的重量, N

m ——流体体积为 V 时的质量, mg

g ——当地重力加速度, m/s^2 。工程计算中一般取 $9.8m/s^2$

单位体积流体所具有的重量称为重度, 又称容重, 用 γ 表示, 则有

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

在国际单位制中, 容重的单位是 N/m^3 。水的容重常采用 $9800N/m^3$ 。而工程单位制中水的容重是 $1000kgf/m^3$ 或 $1t/m^3$ 。

1.2.3 压缩性与膨胀性

流体的压缩性是指在温度一定的条件下，流体受压体积缩小，密度加大，除去外力又能恢复原状的性质。流体的膨胀性是指在压强一定时，流体受热体积膨胀，密度减小，温度下降后又能恢复原状的性质。

液体和气体虽然都是流体，但它们的压缩性和膨胀性大不一样，下面分别介绍。

1.2.3.1 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性一般用体积压缩系数 α_p 来表示，它是指单位压强所引起的体积减少率。设液体的原有体积为 V ，当压强增加 dp 后，体积减少 dV ，则体积压缩系数为

$$\alpha_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-6)$$

α_p 的单位是压强单位的倒数，即 Pa^{-1} 。由于体积随压强的增大而减少，所以 $\frac{dV}{V}$ 和 dp 异号，式中右侧加一负号，以保证 α_p 为正值。显然， α_p 越大，说明液体越容易压缩。

在液体随压强增大，体积减少，密度增大过程中，液体的质量并没有发生变化，即 $dm = 0$ ，而 $dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$ ，于是有 $-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$ ，故体积压缩系数又可写为

$$\alpha_p = \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dp} \quad (1-7)$$

工程中常常用液体的体积压缩系数的倒数，即弹性模量 E 来表示液体的压缩性

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

E 的单位与压强相同，即为 Pa 。显然， E 越大，说明液体越不易压缩。

液体的膨胀性一般用体积膨胀系数 α_v 来表示，它是指在压强一定时，单位温升所引起的体积增大率，即

$$\alpha_v = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} \quad (1-9)$$

α_v 的单位是温度的倒数，即 K^{-1} 。 α_v 值越大，则液体的膨胀性越大。

同理，体积膨胀系数也可表示为

$$\alpha_v = -\frac{\frac{d\rho}{\rho}}{dT} \quad (1-10)$$

表 1-2、表 1-3 分别给出了一个大气压下水的体积压缩系数 α_p 和体积膨胀系数 α_v 的值。

表 1-2 水的体积压缩系数

压强/at	5	10	20	40	80
$\alpha_p (\times 10^{-9}) / \text{Pa}^{-1}$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

注：at = $9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$

表 1-3 水的体积膨胀系数

温度/ $^{\circ}\text{C}$	10 ~ 20	40 ~ 50	60 ~ 70	90 ~ 100
$\alpha_v (\times 10^{-4}) / \text{K}^{-1}$	1.50	4.22	5.56	7.19

从表 1-2、表 1-3 中可以看出，水的压缩性和膨胀性都很小。压强每升高 1at，水的密度仅增加约 1/20000；在常温下（20℃左右），温度每升高 1℃，水的密度仅减少约 1.5/10000。

所以，通常情况下，水的压缩性和膨胀性可以忽略不计。只有在某些特殊情况下，如水管阀门突然关闭时发生水锤现象，自然循环的热水采暖系统计算等问题，才需要考虑水的压缩性和膨胀性。

1.2.3.2 气体的压缩性和膨胀性

所有气体都具有明显的压缩性和膨胀性。在温度不过低（热力学温度不低于 253K）、压强不过高（不超过 20MPa）时，常见气体（如空气、氮气、氧气、二氧化碳）的密度、压强和温度三者之间的关系，完全符合理想气体状态方程，即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-11)$$

式中 p ——气体的绝对压强，Pa

ρ ——气体密度，kg/m³

T ——气体的热力学温度，K

R ——气体常数，标准状态下： $R = \frac{8314}{n}$ [J/(kg·K)]， n 为气体的相对分子质量。空气的气体常数为 287 J/(kg·K)

气体在运动中，其状态变化可分为等温过程（在气体整个状态变化过程中温度保持不变）、等压过程（在气体整个状态变化过程中压强保持不变）和绝热过程等。理论和实验分析证明：在等温过程中，气体的比体积（密度的倒数称之）与压力成反比，密度与压力成正比关系变化；在等压过程中，气体的比体积与温度成正比，密度与温度成反比关系变化。

在工程实际中，凡是气体状态变化缓慢，或气流速度较低时，气体能与外界进行充分的热交换，即可认为它与外界温度相同，可以按等温过程处理。如缓慢充气或排气时，储气罐中的气体状态变化为缓慢压缩或缓慢膨胀的过程，均视为等温过程；当压力变化小而温度变化较大时，一般可按等压过程处理。如在热气流烘砂的气流输送系统中，温度一般可由 200℃降低到 50℃，而压力变化相对较小，因此可以视为等压过程。

最后应该指出：对于低速气流，其速度远小于音速，密度变化往往较小，例如气流速度小于 50m/s 时，密度变化小于 1%，通常可以忽略压缩性的影响，按不可压缩流体处理，其结果也是足够精确的。

1.2.4 黏 性

【实例 1-2】静止时油和水在状态上没有什么区别，但如果把瓶中的水和油倒出时，会发现水比油流得更快；而到了冬天，油的流动更显得慢些；在锅中加热的油显得易于流动；用热水洗油碗比冷水更易洗干净。

【问题】这些现象是流体的什么性质的表现？它是怎样产生的？又具有什么特性？与哪些因素有关？

1.2.4.1 黏性的概念

上述这些现象从感性上说明，运动中的流体表现出一种阻挠其自身运动的性质，而且这一性质不仅与流体的种类有关，还与温度有关。下面请大家先看一个演示实验（参见实验）。

从实验现象我们得出：静止时流体虽然不能承受剪切力，但在运动状态下，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，我们称流体的这种性质为黏性，称内摩

擦力为黏滞力。流体运动时产生黏性的原因，实际是流体内聚力（流体分子与分子间的吸引力）的存在和流体质点或流层间能量交换的结果，是流体分子间内聚力的一种表现形式。而静止状态的流体不表现出黏性。

液体和气体都具有黏性，只是相同条件下程度不同而已，通常情况下液体的黏性比气体大。这是因为液体的分子距远远小于气体的分子距，而分子间引力却较气体强得多。

1.2.4.2 黏性的量度

黏性是流体最重要的一个物理力学性质，它为我们以后研究流体运动时产生能量损失提供了答案。

衡量流体黏性大小的物理量有两个，即动力黏度 μ 和运动黏度 ν 。

动力黏度的概念是牛顿在 1686 年，根据流体层状流动实验而首先提出来的，这就是为后人以大量的实验研究和理论分析所验证的流体内摩擦定律。牛顿层状流动实验示意图如图 1-1 所示，在相距 h 的两块很大的木板间充满液体，下板固定，上板以匀速 u 平移。由于液体分子与木板表面的附着力的存在，于是黏附于上平板表面的一层流体随平板以速度 u 运动，并逐层向内影响，各层相继流动，直至黏附于下平板的流层速度为零。在 u, h 都较小的情况下，流体运动速度则从上板向下板呈直线递减的规律分布，其间任一液体质点的 u 为

$$u = \frac{y}{h} u_0 \quad (1-12)$$

上下两板间的液体可以看成由许多无限薄的液体流层组成。当快层在慢层上滑动时接触面必然产生切向的作用力，即内摩擦力 F 。实验结果表明：内摩擦力 F 与相邻两流层间的接触面积 A 、液体的黏性及流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比关系，而与接触面上的压力无关。这就是牛顿内摩擦定律的基本内容，其数学表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

式 (1-13) 两边同除 A ，则得

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中 F ——相邻两流层间的内摩擦力，N

A ——相邻两流层间的接触面积， m^2

τ ——相邻两流层间接触面上单位面积上的内摩擦力，Pa

μ ——流体的动力黏度，常简称为黏度，与流体的性质、温度等有关。在国际单位制中， μ 的单位为 $Pa \cdot s$

$\frac{du}{dy}$ ——表示流速沿垂直于速度方向（速度的法线方向）的变化率，称为流速梯度

为了更好地理解速度梯度的意义，在图 1-1 中垂流速方向 y 轴上任取一边长 dy 的方形流体微团，这里微团就是质点，只是在考虑尺度效应（旋转、变形）时，习惯上称为微团。由于其下表面的运动速度 u 小于上表面的运动速度 $u + du$ ， dt 时段后，下表面的移动距离 udt 小于上表面的移动距离 $(u +$

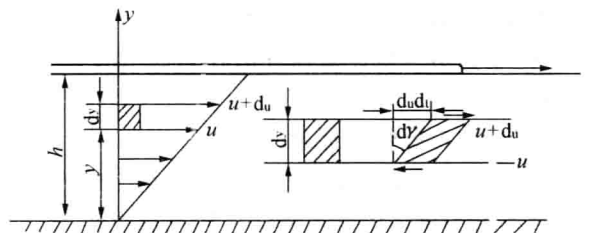


图 1-1 牛顿层状流动实验示意图

$du) dt$, 因而流体微团除位移外, 还发生剪切变形 $d\gamma$, 由于 dt 是一个微小时段, 因此转角 γ 也很小, 所以

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du}{dy} dt$$

故

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy}$$

可见, 流速梯度就是直角变形速度, 它是在切应力作用下发生的, 故又称为剪切变形速度。因此, 牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪应力变形速度成正比。

由牛顿内摩擦定律可得动力黏度

$$\mu = \frac{T}{A} \frac{du}{dy} = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-15)$$

由上式可知, 动力黏度 μ 的物理意义就是当流速梯度等于 1 时, 流层接触面单位面积内的摩擦力值, 或流层接触面上的切应力值即为 μ 值。

在分析黏性流体的运动规律时, 经常会用到 μ 和 ρ 的比值, 为了方便起见, 流体力学中习惯把它们组合成一个量, 用 ν 来表示, 又因其量纲是表示运动的单位, 故称为运动黏度, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

在国际单位制中, ν 的单位是 m^2/s 。

1.2.4.3 黏性的影响因素

流体的黏度一般随温度和压强的变化而改变, 但实验证明, 在低压情况下 (通常指低于 100at), 压强变化对流体黏度的影响很小, 一般可以忽略。因而温度是影响流体黏度的主要因素。液体和气体的黏度受温度影响而变化的规律是不同的, 液体的 μ 值随温度的升高而减小, 而气体的 μ 值则随温度的升高而增大。【实例 1-2】中的各种情况就是很容易理解的流体黏性的表现。一般以 15℃ 作为标准温度, 则水和空气的黏度为

水: $\mu = 1.140 \times 10^{-3} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ $\nu = 1.145 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{/s)}$

空气: $\mu = 1.785 \times 10^{-5} \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$ $\nu = 1.450 \times 10^{-5} \text{ (m}^2\text{/s)}$

水和空气在一个大气压、其它温度下的动力黏度和运动黏度分别见表 1-4。

表 1-4 标准大气压下空气和水的物理性质

流体类别	温度 t / °C	密度 ρ / (kg/m ³)	容重 γ / (N/m ³)	动力黏度 μ / $\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	运动黏度 ν / ($\times 10^{-6} \text{ m}^2\text{/s}$)	表面张力 σ / (N/m)
水	0	999.9	9805	1.792	1.792	0.0756
	5	1000.0	9807	1.518	1.519	0.0749
	10	999.7	9804	1.308	1.308	0.0742
	15	999.1	9798	1.140	1.140	0.0735
	20	998.2	9789	1.005	1.007	0.0728
	30	995.7	9764	0.801	0.804	0.0712
	40	992.2	9730	0.656	0.661	0.0692
	50	988.1	9689	0.549	0.556	0.0679
	60	983.2	9642	0.469	0.477	0.0662
	70	977.8	9589	0.406	0.415	0.0644
	80	971.8	9530	0.357	0.367	0.0626
	90	965.3	9466	0.317	0.382	0.0608
	100	958.4	9399	0.284	0.296	0.0589

续表

流体类别	温度 t /°C	密度 ρ / (kg/m ³)	容重 γ / (N/m ³)	动力黏度 μ / $\times 10^{-3}$ Pa·s	运动黏度 ν / ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	表面张力 σ / (N/m)
空 气	0	1.293	12.68	1.71	13.7	
	10	1.248	12.24	1.76	14.7	
	20	1.205	11.82	1.81	15.7	
	30	1.165	11.43	1.86	16.7	
	40	1.128	11.06	1.90	17.6	
	50	1.039	10.54	1.96	18.6	
	60	1.060	10.40	2.00	19.6	
	70	1.029	10.12	2.04	20.5	
	80	1.000	9.81	2.09	21.7	
	90	0.973	9.50	2.16	22.9	
	100	0.946	9.28	2.18	23.6	

最后还应指出的是，牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，而对某些特殊流体，如油漆、泥浆、浓淀粉糊等是不适用的。我们将符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、酒精、空气等，不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体。根据本教材的任务，我们仅限于研究牛顿流体。

1.2.5 表面张力特性

【实例 1-3】杯中的水或啤酒可以高过杯口而不外溢；细小的钢针可以浮在液面上而不下沉；水银滴落在玻璃板上则紧缩成小球状在玻璃板上滚动等。

【问题】为什么具有流动性，不能承受剪切力的液体，会表现出与其基本特征近乎矛盾的现象呢？这是液体的一种什么性质？

1.2.5.1 液体的表面张力

由于分子间引力的作用，在液体表面上产生了一种极其微小的拉力，它具有使液体表面积尽可能地缩至最小（即球面），形成一张均匀受力的弹性薄膜，我们把这种力称为液体的表面张力。表面张力不仅存在于液体的自由表面，也存在于液体与其它气体、固体或另一种与该液体不相混合的液体的分界面上。它是由于处在液体表面上的液体分子所受的分子引力作用内外不平衡而引起的一种宏观效应。气体由于分子间引力很小，扩散作用极强，不具有自由表面，因此也就不存在表面张力。所以，表面张力是液体的特有性质。同时，它仅存于液体的表面，在液体内部则不存在。其中原因请大家分析。

表面张力的方向总是与液体表面相切，且垂直于长度方向。表面张力的大小常用液体表面单位长度所受的张力，即表面张力系数来度量，用 σ 表示，单位为 N/m。 σ 的数值与液体的种类有关，并随温度和表面接触情况的不同有所变化。在一个标准大气压下，水和空气接触的表面 σ 随温度的变化值可见表 1-4。

从表 1-4 可以看出，液体的表面张力是很小的，在工程中没有什么实际意义，一般可以忽略不计。但当液体表面呈曲面，且曲率半径很小时，就必须考虑它的影响。液体表面的形状取决于相接触的两种介质的性质，这种性质主要是指液体内分子间的引力，及液体与相邻介质接触面上两种分子间吸引力的大小。我们把液体分子间的吸引力称为内聚力，把液体分子与固体壁面分子之间的吸引力称为附着力。例如，水滴落在洁净的玻璃板上，立即会向四周漫开，形成一小片薄薄的水层，附着在玻璃板上，这说明水分子的内聚力小于水分子与玻

璃分子间的附着力；【实例 1-3】中水银滴落在玻璃板上则紧缩成小球状在玻璃板上滚动的现象，正说明水银分子间的内聚力大于水银分子与玻璃分子间的附着力。

下面阐述的毛细现象就是液体表面张力作用较明显的例子。

1.2.5.2 毛细现象

【实例 1-4】仔细观察一装有水的容器，你会发现贴近容器内壁的液体表面上弯，沿壁面“爬”上一小段距离，当一根两端开口的细玻璃管插入后，管中液面向上弯曲成凹面，并高出容器液面一段距离；再观察另一装有水银的容器，你却会发现贴近容器内壁的液体表面向下弯曲，将同样的玻璃管插入后，管内液面下降且向下弯曲，形成凸形的自由面。如图 1-2 所示。

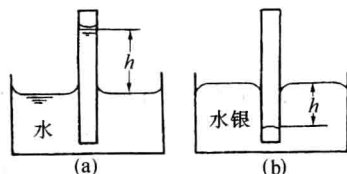


图 1-2 毛细现象

【问题】细管中液柱为什么会上升或下降？上升或下降的高度与什么有关？

在流体力学中，将直径很小两端开口的细管插入液体中，管中液面出现向下或向上弯曲，且管中液体相对上升或下降的现象，均称为毛细现象，该细管称为毛细管。为什么毛细管中的液面会呈凸状或凹状，相信大家由内聚力和附着力的关系中已经理解。至于管中液面为什么会上升或下降一段高度，高度的大小如何，则与液体表面张力密切相关。这是液体与固体交界面的表面张力问题。

当液体与固体间的附着力大于液体的内聚力时，液面下凹，此时表面张力出现了一个向上的合力，在此合力作用下，管中液面上升，直到上升的液柱重量与此合力相平衡为止，如图 1-2 (a)。相反，当液体的内聚力大于液体与固体间的附着力时，液面向上凸起，此时表面张力出现了一个向下的合力，在此合力作用下，管中液面下降，直到管外液柱的压力与此合力相平衡为止，如图 1-2 (b)。

由此可见，毛细管中液面上升或下降的高度是由表面张力的决定的。设液面与管壁的接触角为 θ ，管径为 d (半径为 r)，液体密度为 ρ ，表面张力为 σ ，则由表面张力的合力与液柱重量相平衡的关系有

$$\pi d \sigma \cos \theta = \frac{1}{4} \pi d^2 h \rho g$$

整理得

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1-17)$$

其中接触角 θ 与液、气的种类和管壁的材料等因素有关。实验表明，水与玻璃的接触角 $\theta = 0$ ，而水银与玻璃的接触角 $\theta \approx 140^\circ$ 。20℃时水的表面张力 $\sigma = 0.0728 \text{N/m}$ ，水银的表面张力 $\sigma = 0.465 \text{N/m}$ ，水的密度 $\rho = 998.2 \text{kg/m}^3$ ，水银的密度 $\rho = 13\,550 \text{kg/m}^3$ ，分别带入式 (1-17) 可得

水在玻璃管中的上升高度

$$h = \frac{29.8}{d}$$

水银在玻璃管中的下降高度

$$h = \frac{10.5}{d}$$

式中玻璃管的内径 d 均以 mm 计。

由上两式可知，毛细管中液面上升或下降的高度与管径成反比，即管内径越小，管内外液面相对差值 h 就越大。在流体力学 (或水力学) 实验室中，经常用装有水或水银的细玻