



普通高等学校“十二五”力学精品教材

# 工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

莫乃榕 编



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

普通高等学校“十二五”力学精品教材

# 工程流体力学

莫乃榕 编

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 内 容 提 要

本书介绍流体力学的基本原理以及工程应用。全书共分8章,内容包括导论、流体静力学、理想流体运动的基本方程、不可压缩黏性流体的一元流动、不可压缩理想流体的平面势流、不可压缩黏性流体的平面流动、可压缩流体动力学基础、量纲分析和相似理论。本书物理概念清晰,数学推演简明扼要,阐述深入浅出,例题、思考题、习题与教学内容融为一体。本书可作为能源与动力工程、机械工程、建筑环境与能源应用工程、船舶与海洋工程等专业的流体力学课程教科书,也可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/莫乃榕编. —武汉:华中科技大学出版社,2015.4

ISBN 978-7-5680-0827-3

I. ①工… II. ①莫… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 090736 号

工程流体力学

莫乃榕 编

策划编辑:徐正达

责任编辑:刘 飞

封面设计:刘 卉

责任校对:祝 菲

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:仙桃市新华印务有限责任公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:17

字 数:350千字

版 次:2015年7月第1版第1次印刷

定 价:34.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 前 言

“工程流体力学”是基础理论与工程应用之间的知识桥梁,出版一本读者喜欢的教科书,一直是笔者的夙愿。笔者曾经出版过《工程流体力学》,并且被许多高等学校选用。为了适应当前的人才培养模式和要求的变化,笔者在发扬原教材优点的基础上,重新动笔耕耘,经过一年多的努力写成此书。这本教材的编写特别注意了两个原则。一个原则是教材内容万变而不离其宗。“万变”,就是不断更新内容,更新思维方式;教材有了新内容、新思路,才能适应当前教育的发展形势。“宗”,就是流体力学的基本理论和基本规律。另一个原则就是教材要面向读者,要根据读者的思路以及接受能力来阐述流体力学的原理。只有如此,面向读者的教材才能百看不厌,回味无穷。这本教材力求做到系统严密、概念清晰、深入浅出、易学易懂,引导读者逐渐掌握流体力学的分析方法,引导读者在学习“工程流体力学”这门课程中获取知识,享受乐趣。

本书的内容按照从易到难,从简单到复杂的原则进行编排。第1章导论,介绍流体力学的发展史和学习方法,介绍流体的一些力学性质。第2章流体静力学,研究静止压强的分布规律以及物体受到的静压力。第3章理想流体运动的基本方程,介绍流体运动的理论以及基本方程,这一章的数学推演力求简单明了,尽量降低数学难度。后面各章都属于专题。第4章不可压缩黏性流体的一元流动。第5章不可压缩理想流体的平面势流。第6章不可压缩黏性流体的平面流动,包括黏性层流精确解和边界层理论。第7章可压缩流体动力学基础。第8章量纲分析和相似理论,介绍有关流体力学实验的理论问题。各章的例题和习题都经过精选,与理论保持同步。每章后面的选择题富有特色,对初学者特别有益。

本书适用于机械工程、能源动力工程、建筑环境与能源应用工程、船舶工程、环境工程的50~60学时的“工程流体力学”课程的教学。

流体力学博大精深,本书只是从工程应用的角度去理解和介绍流体运动的若干问题。由于编者知识水平有限,书中错误难免,希望专家和读者批评指正。

莫乃榕

2015年3月

## 主要符号表

$A$	面积
$a$	加速度
$B, b$	宽度
$c$	声速
$C_p$	压强系数
$c_p$	比定压热容
$c_v$	比定容热容
$D, d$	直径
$E$	(固体)弹性模量, 内能
$e$	内能
$F$	力
$Fr$	弗劳德数
$f$	质量力
$G$	重力
$g$	重力加速度
$H, h$	高度, 水深
$K$	开(热力学温度单位)
$K$	(流体)体积模量
$L, l$	长度
$m$	质量
$Ma$	马赫数
$P$	功率
$p$	压强
$p_g$	表压强
$p_v$	真空压强
$Q$	热量
$q$	体积流量
$q_m$	质量流量
$R$	气体常数
$Re$	雷诺数
$Sr$	斯特劳哈尔数
$s$	比熵

---

$T$	热力学温度
$t$	时间, 摄氏温度
$U$	速度
$u$	速度
$V$	体积
$v$	平均速度, 比体积
$v_x, v_y, v_z$	速度分量
$W$	功, 复位势
$\alpha$	动能修正系数
$\beta$	动量修正系数
$\Gamma$	速度环量
$\gamma$	比热比
$\Delta$	绝对粗糙度
$\delta$	边界层厚度
$\delta^*$	边界层位移厚度
$\delta^{**}$	边界层动量损失厚度
$\epsilon$	线变形速率
$\zeta$	局部损失因数
$\kappa$	体积压缩率
$\Delta$	(气体)速度系数
$\lambda$	沿程损失系数
$\mu$	动力黏度, 流量系数, 马赫角
$\nu$	运动黏度
$\rho$	密度
$\sigma$	正应力, 表面张力系数
$\tau$	切应力
$\varphi$	速度势函数
$\psi$	流函数
$\omega$	角速度

# 目 录

第 1 章 导论	(1)
1.1 流体力学的研究任务和研究方法	(1)
1.2 连续介质假设	(3)
1.3 流体的密度	(3)
1.4 流体的黏性	(5)
1.5 表面张力	(7)
1.6 作用在流体上的力	(10)
选择题	(11)
习题	(12)
第 2 章 流体静力学	(14)
2.1 静止流体的应力特征	(14)
2.2 流体静止的微分方程	(15)
2.3 静止液体的压强分布	(16)
2.4 液柱式测压计	(18)
2.5 静止大气的压强分布 国际标准大气	(20)
2.6 静止液体作用在平面壁和曲面壁上的总压力	(22)
2.7 液体的相对静止	(29)
2.8 浮体的平衡	(32)
选择题	(35)
习题	(36)
第 3 章 理想流体运动的基本方程	(42)
3.1 描述流体运动的两种方法	(42)
3.2 流线和流管	(46)
3.3 连续性方程	(49)
3.4 理想流体运动微分方程	(52)
3.5 伯努利方程	(53)
3.6 压强沿流线法向的变化	(55)
3.7 总流的伯努利方程	(56)
3.8 伯努利方程的应用	(57)
3.9 非定常流动的伯努利方程	(61)



3.10 动量方程和动量矩方程及其应用 .....	(63)
选择题 .....	(72)
习题 .....	(74)
<b>第4章 不可压缩黏性流体的一元流动 .....</b>	<b>(81)</b>
4.1 黏性流体的伯努利方程 .....	(81)
4.2 流体运动的两种流态 .....	(83)
4.3 圆管中的层流 .....	(86)
4.4 紊流的特性 .....	(89)
4.5 圆管紊流 .....	(91)
4.6 沿程损失因数的经验公式 .....	(95)
4.7 沿程损失因数的实验研究 .....	(96)
4.8 局部水头损失 .....	(100)
4.9 工程应用举例 .....	(103)
4.10 管流中的水击 .....	(110)
选择题 .....	(113)
习题 .....	(115)
<b>第5章 不可压缩理想流体的平面势流 .....</b>	<b>(119)</b>
5.1 概述 .....	(119)
5.2 流体微团运动分析 .....	(119)
5.3 速度环量 .....	(124)
5.4 速度势函数和流函数 .....	(128)
5.5 复位势 .....	(133)
5.6 基本平面势流 .....	(135)
5.7 几种势流的叠加 .....	(140)
5.8 圆柱体绕流的复位势 .....	(145)
选择题 .....	(150)
习题 .....	(151)
<b>第6章 不可压缩黏性流体的平面流动 .....</b>	<b>(154)</b>
6.1 黏性流动概述 .....	(154)
6.2 黏性层流精确解 .....	(154)
6.3 黏性流体的运动微分方程及边界条件 .....	(160)
6.4 边界层流动 .....	(164)
6.5 边界层动量积分关系式 .....	(169)
6.6 平板边界层的近似计算 .....	(170)
6.7 边界层分离 .....	(175)



---

6.8 绕流物体的阻力 .....	(176)
6.9 自由淹没射流 .....	(180)
6.10 管道入口和弯管中的边界层 .....	(183)
选择题 .....	(184)
习题 .....	(185)
<b>第7章 可压缩流体动力学基础</b> .....	(188)
7.1 热力学基本公式 .....	(188)
7.2 绝热流动的能量方程 .....	(191)
7.3 微弱扰动波的传播 声速 .....	(192)
7.4 一元等熵流动的基本关系式 .....	(196)
7.5 一元等熵气流在变截面管道中的流动 .....	(200)
7.6 有摩擦和热交换的一元可压缩流动 .....	(207)
7.7 膨胀波 .....	(214)
7.8 正激波 .....	(218)
7.9 斜激波 .....	(223)
7.10 激波的反射和相交 .....	(227)
7.11 拉伐尔喷管的正激波 .....	(231)
选择题 .....	(232)
习题 .....	(233)
<b>第8章 量纲分析和相似理论</b> .....	(236)
8.1 量纲和单位 .....	(236)
8.2 量纲分析法 .....	(238)
8.3 流动相似原理 .....	(242)
8.4 相似准则的选择 .....	(246)
选择题 .....	(247)
习题 .....	(248)
<b>参考答案</b> .....	(249)
<b>附录</b> .....	(257)
<b>参考文献</b> .....	(262)

# 第 1 章 导 论

## 1.1 流体力学的研究任务和研究方法

物质的存在有固体、液体和气体等三种形态。这三种物质形态因分子间距、分子间作用力大小的不同而表现出不同的力学特性。固体的分子间距很小,分子间作用力很大,固体微粒(分子、原子、离子)排列成空间点阵的形式,固体分子只能在其平衡位置作小幅的摆动。固体受到剪力作用时会产生弹性变形而达到平衡状态。液体的分子间距比较大,分子间作用力比较弱,分子无固定位置。液体分子可以在其他分子之间移动,但分子间作用力又不能允许液体分子运动到远离其他分子的空间位置。液体没有固定的形状,但有不变的体积。气体的分子间距最大,分子间作用力最小。气体分子可以在空间里自由移动,气体没有固定的形状,也没有固定的体积。液体和气体的分子都没有固定的空间位置,受到剪切力的作用时,液体和气体都不能保持静止平衡状态,而是发生连续不断的变形运动,即产生流动,直至剪切力消失为止。液体和气体合称为流体。

流体力学是研究流体在外力作用下平衡和运动规律的一门学科,是力学的一个分支。流体力学研究众多的流体流动问题,每一类流动问题又形成一个流体力学的分支。研究液体(不可压缩流体)的称为水力学,研究可压缩流体(主要是气体)的称为可压缩流体力学,研究工程中常见的流体流动问题的学科称为工程流体力学。此外,流体力学还和其他学科渗透,形成一些交叉边缘学科,如生物流体力学、电磁流体力学、化学流体力学、高温气体力学等等。

流体力学是在人类征服自然、改造自然的实践中产生和发展起来的。流体力学的任务就是研究和解决各个领域中出现流体力学流动问题。流体力学是伴随科学技术的发展而出现的。科学技术、工程技术的发展史也就是流体力学的发展史。

人类对流体的认识是从治水、用水开始的,流体力学(水力学)的初步形成可以追溯到 17 世纪。从中世纪开始,人们开始大规模地兴修水利工程、修筑城镇给水排水系统,开始认识和利用水流的知识。1653 年,法国科学家帕斯卡(B. Pascal)发现了静水压强可以传遍整个流场的帕斯卡原理。后来,他提出了流体静力学的基本公式。1687 年,牛顿(I. Newton)用实验方法研究了运动平板所受的流体阻力,提出了流体的黏性切应力与速度梯度成正比的计算公式,为以后研究黏性流体的运动奠定了基础。1738 年,伯努利(D. Bernoulli)对输水管路进行大量的观察和测量,提出了著名的伯努利定理。1775 年,欧拉(L. Euler)提出了无黏性流动的运动方程,为理论流体

力学的研究奠定了理论基础。随着生产的发展,人们不断探索黏性流动的规律。1823年,法国人纳维(L. Navier)、英国人斯托克斯(G. Stokes)分别用不同的方法建立了黏性流体运动的微分方程,从此,流体力学得到迅速的发展。到19世纪末,水力学和水动力学已达到相当高的水平。进入20世纪以后,随着航空、航天事业的发展,边界层理论、紊流理论、可压缩流体力学都获得巨大的成就。1904年,德国学者普朗特(L. Prandtl)提出了边界层理论,开创了现代流体力学。1910年,俄国科学家儒可夫斯基用保角变换法获得了一种理想的翼型,使人类的航空、航天事业得到迅猛的发展。超声速飞机的出现,人造卫星和航天飞机进入太空,使流体力学的理论日臻成熟,成为一个严密、系统的学科。20世纪后半期,科学技术迅猛发展。进入21世纪以后,流体力学的发展得到进一步的继续和深化。计算流体力学的完善,超大型计算机的出现,许多流体力学问题得到解决,许多流动的细节得以逼真地显示出来。我国的三峡水利枢纽、29.7万吨“长江之珠”油轮、神舟十号飞船、天宫一号空间站,都显示出流体力学的最新成就。

纵观流体力学的发展历史可以清楚地看出,生产的发展和需要是流体力学研究的动力。流体力学的任务就是解决科学研究和工农业生产中遇到有关流体流动的问题。人类的生产和科学技术发展到今天,对流体力学提出的问题越来越多,很多工农业部门都存在大量的流体力学问题。现在很难找出一个技术部门,它的发展能够与流体力学无关。众所周知,航空、水利、机械、动力、船舶、冶金、建筑、环境、市政工程等部门都存在大量的流体力学问题,有待深入研究。动力工程中流体的能量转换,机械工程中的润滑、液压传动、气体传送,船舶的行波阻力,高温液态金属的流动,建筑工程的通风通水,高层建筑的风载荷,铁路、公路隧道的压力波传播,高速列车的气动力学稳定性,燃烧过程的空气动力学特性,血液在微血管中的黏性流动,大气中的污染扩散,等等,这些都是工程技术人员经常遇到的流体力学问题。工程流体力学将为从事这些工程技术工作的人员提供必要的流体力学理论知识。《工程流体力学》除了介绍流体力学的基本概念、基本原理之外,还介绍如何将这些基本概念和原理应用于工程实际,推导一些工程上常用的公式,使读者掌握流体力学在工程中的分析方法和计算方法。

工程流体力学和其他物理学科一样,其研究方法主要有理论分析、实验研究和数值计算等三种。理论分析法是根据工程实际中的流动现象的特点,建立流体运动的方程,运用各种数学工具准确地或近似地求解方程的方法。理论分析法的特点在于科学的抽象,能够用数学方法求出理论的结果,揭示流体运动的内在联系。实验研究法根据模化理论,在模型流场上进行观察和测量,揭示一些流动要素的实际联系。实验方法能直接解决工程实际的复杂问题,并能发现一些新的流动现象。数值计算法是将流体力学方程和边界条件离散化,用计算机求出数值解。数值计算法目前已成为解决流体力学问题的强有力的方法。本课程主要介绍理论分析法和实验研究法,

数值计算法则在其他相关课程介绍。

## 1.2 连续介质假设

流体是由分子组成的,分子之间保持一定的距离,流体的分子处在永无休止的运动状态中。因此,从微观的角度来看,流体的物理量如质量、温度等在空间上的分布是不连续的。如果要从微观上研究流体力学问题,就要用分子运动学说研究每一个分子的微观运动规律。工程流体力学所讨论的问题的特征尺寸远大于流体分子的尺度,人们感兴趣的问题并不是流体分子的微观特征,而是流体的宏观特征,即大量分子的统计平均特性,如流体的密度、温度、压强等。从宏观上研究流体的运动规律时,有理由把流体视为连续介质,认为液体和气体充满一个体积时不留任何空隙,流体的质量是连续分布的,流体的速度、温度也是连续分布的。此外,分子不停运动,时而碰撞,其速度是突变的,但人们不关心分子的这种运动,而只关心流体的宏观速度。我们有理由认为流体的宏观速度不会像分子运动速度那样会发生突变,而是在时间上连续分布的。

认为流体在空间上不留任何空隙地连续分布,这种假设称为连续介质假设。

实践证明,采用连续介质来解决工程实际问题,其结果是合理的。例如,在正常情况下,1 mm<sup>3</sup> 的体积水有  $3.3 \times 10^{19}$  个分子,空气有  $2.7 \times 10^{16}$  个分子,即使  $10^{-10}$  mm<sup>3</sup> 体积(相当于一粒灰尘的体积)的空气也还有  $2.7 \times 10^6$  个分子,空气的物理量仍具有统计平均的特征。因此,采用连续介质的假设是合理的。这样,流体的一切特征,例如压强、温度、密度、速度等都可以看成为空间和时间连续分布的函数,流体力学的问题可以用连续函数这个强有力的数学工具来进行研究。当然,在一些特殊的情况下,连续介质假设是不能成立的。例如,航天器在高空稀薄的空气中飞行时,气体分子自由程与航天器的尺寸具有同样的数量级,血液在微血管里(直径约为  $10^{-4}$  cm)的流动,这些情况下都不能采用连续介质假设。

## 1.3 流体的密度

流体的密度是单位体积流体具有的质量。在均质流体中,如果体积  $V$  内的流体质量是  $m$ ,则密度  $\rho$  为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

密度  $\rho$  的单位是 kg/m<sup>3</sup>。

对于非均质流体,各处的密度值不同,这时,密度  $\rho$  的定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

式中,  $\Delta V \rightarrow 0$  只能视作趋于足够小,不能理解为数学上的趋于零。从微观上看,如果

微元体积  $\Delta V$  趋小到流体分子的尺度,则在这么小的体积里流体的质量就不再具有统计特征。因此,对于  $\Delta V \rightarrow 0$ ,应理解为趋于宏观上足够小而微观上足够大的微体积。这种宏观上足够小而微观上足够大的微体积称为**流体微团**,或称为**流体质点**。

密度的倒数称为**比体积**,记作  $v$ ,即  $v=1/\rho$ ,其单位是  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,它表示单位质量流体所占据的体积。

流体的密度与温度和压强有关。温度或压强的变化都会引起密度的变化,即

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT \quad (1.3)$$

密度的相对变化率为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} dT = \kappa dp - \alpha_v dT \quad (1.4)$$

式中,  $\kappa$  称为流体的**体积压缩率**,它表示在温度不变的情况下,增加单位压强所引起的密度变化率。体积压缩率常常用比体积表示,即

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} = - \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} \quad (1.5)$$

液体的体积压缩率  $\kappa$  很小,工程上常常使用它的倒数,称为**体积模量**,记作

$$K = - \frac{\Delta p}{\Delta v/v} = \frac{\Delta p}{\Delta \rho/\rho} \quad (1.6)$$

体积模量  $K$  的单位与压强单位相同,即为 Pa。

$\alpha_v$  称为**体膨胀系数**,它表示在压强不变的条件下,增加单位温度所引起的体积变化率,即

$$\alpha_v = - \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta T} = \frac{\Delta v/v}{\Delta T} \quad (1.7)$$

由于压强不变时,温度增加,体积增加,密度减小。因此定义中冠以负号。

对于气体,其密度、压强和温度应满足状态方程

$$p = \rho R T \quad (1.8)$$

式中,  $p$  为气体压强,单位为 Pa;  $T$  为热力学温度,单位为 K;  $R$  为气体常数,对于空气,  $R=287 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ 。由状态方程可以求得气体的体积压缩率和体膨胀系数分别是  $\kappa=1/p$ ,  $\alpha_v=1/T$ 。

**例 1.1** 在常温下,水的体积模量  $K=2.81 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,如果水的压强从  $10^5 \text{ Pa}$  增至  $12 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,求水的体积变化率。

**解** 由定义得

$$\frac{\Delta v}{v} = - \frac{\Delta p}{K} = -0.424\%$$

负号说明,压强增大,则体积变小。

## 1.4 流体的黏性

黏性是流体抵抗变形的能力。它是流体的固有属性。黏性切应力则是黏性的具体表现。

流体在运动时,如果相邻两层流体的速度不同,则在它们的分界面上将产生切应力。运动快的流层对运动慢的流层施以拖力,而运动慢的流层则对运动快的流层施以阻力,这对力称为流层之间的内摩擦力或黏性力。

流体的黏性实验是由牛顿时于 1687 年首次进行的。如图 1.1 所示,两块平行平板相距为  $h$ ,其间充满黏性液体。下板不动,上板以速度  $v$  在自身平面内作匀速运动。为了维持上板的匀速运动,必须在平板上施加一个拖力  $F$ 。实验表明,拖力  $F$  与板的面积  $A$  和速度  $v$  成正比,而与两板间的距离  $h$  成反比,其比例系数称为流体的黏度,记作  $\mu$ ,即

$$F = \mu A \frac{v}{h} \quad (1.9)$$

显然,施加于单位面积上的拖力(切应力)为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{v}{h} \quad (1.10)$$

分析平板的运动可以看出,平板作匀速运动,作用在平板上的外力和等于零。因此,平板除了受拖力  $F$  作用之外,还应该有另外的力与力  $F$  大小相等、方向相反,这个力就是作用在上板下表面的流体施加给平板的黏性切应力。

进一步的观察和测量都表明,上板移动时,贴紧上板下表面的流体质点的速度与上板的速度  $v$  相同。下板静止不动,贴紧下板上表面的流体质点的速度也就为零。当速度  $v$  不大时,两板间的流体速度近似为线性分布。距离下板  $y$  处,流体的速度为  $v_x = v \frac{y}{h}$ 。式(1.10)表示,流体的黏性切应力与速度梯度成正比。一般情况下,流体的速度不是线性分布,流体的黏性切应力的表达式应为

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1.11)$$

式(1.11)表明,流体的黏性切应力与流体的黏度以及速度梯度成正比,这就是著名的牛顿内摩擦定律。黏度  $\mu$  的单位是  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。由于  $\mu$  出现在切应力公式中,因此  $\mu$  又称为流体的动力黏度。

式(1.11)中的速度梯度,实际上就是流体微团的角变形速率。为了说明这一点,现分析图 1.2 中两条边的长度分别为  $dx$  和  $dx$  的流体微团  $ABCD$  的角变形速率。初始时刻,微团的角  $\angle ACD$  为直角。经过时间  $dt$  后,  $\angle ACD$  不再为直角,它减小了微小角度  $d\varphi$ 。这是因为,  $A$ 、 $C$  两点的速度有差别。设点  $C$  的速度为  $v_x$ ,则点  $A$  的速

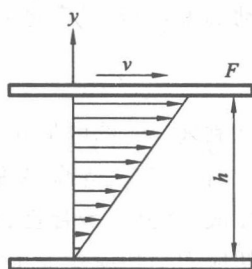


图 1.1 牛顿的黏性实验

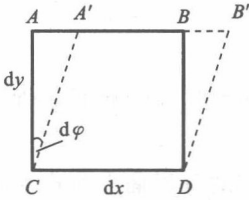


图 1.2 流体微团的角变形

度应为  $v_x + dv_x$ 。点 A 和点 C 的速度差为  $dv_x$ 。经过时间  $dt$  后, A、C 两点有相对位移为  $dv_x dt$ , 流体线 AC 变成倾斜线  $A'C$ , 角度变化量为  $d\varphi = dv_x dt / dy$ , 单位时间内流体微团的角变化速率为  $d\varphi / dt = dv_x / dy$ 。这就说明, 式(1.11)中的速度梯度就是流体微团的角变形速率, 也称为切应变。

在研究流体运动时, 常常用到  $\mu$  与  $\rho$  的比值, 称为运动黏度, 用希腊字母  $\nu$  表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.12}$$

运动黏度  $\nu$  的单位是  $m^2/s$ 。

对水、空气等众多流体而言, 黏性切应力与切应变成正比。但也有很多流体, 例如血液、高分子聚合物、石油等, 其黏性切应力并不与切应变成正比。流体力学把黏性切应力与切应变成正比的流体称为**牛顿流体**, 把黏性切应力与切应变不成正比的流体称为**非牛顿流体**。非牛顿流体在化工、医药、食品、石油等工业部门应用很广。近年来, 非牛顿流体力学成为一个十分活跃的分支学科。

流体的黏性在两个流体速度层中起着传递切应力的作用。黏性力属于内摩擦力, 它的产生原因是流体分子之间存在内聚力以及流体层之间存在分子动量交换。由于分子之间有内聚力(分子引力), 速度慢的流层对速度快的流层施加阻力, 而速度快的流层对速度慢的流层施加拖力, 这就表现为黏性剪切力。另外, 流体的分子处在不停的运动中, 当速度快的流层的分子进入速度慢的流层时, 便将自己携带的比较大的动量释放出来, 给速度慢的流层加速, 即给速度慢层施加一个拖曳力。反之, 速度慢层的流体进入速度快层后, 会吸收快层的动量, 使快层减速, 这相当于施加了一个阻力。

气体的分子间距比较大, 内聚力比较弱。气体的黏性作用主要取决于分子之间的动量交换。因此, 温度越高, 分子之间的动能交换越强烈, 气体的黏性越强。液体的内聚力比较大, 分子之间的动量交换比较弱。液体的黏性主要取决于分子内聚力。温度升高时, 液体内聚力变小, 黏性变弱。

流体的这种黏性与其分子特性有关, 因此这种黏性又称为**流体的分子黏性**。

任何流体都具有黏性。流体在运动时, 流体微团将受到惯性力、压力、重力及黏性力的共同作用。如果黏性力比其他力小得多, 则可以忽略黏性力的影响。不考虑黏性力影响的流体称为**理想流体**。同一种流体, 在某些情况下(例如速度梯度很小)可视为理想流体, 但在另一些情况下必须视为黏性流体。例如, 河水绕桥墩流动时, 在桥墩附近, 水流的速度梯度大, 黏性力对流动的影响很大, 这时的水视为黏性流体。而在远离桥墩的地方, 速度梯度很小, 这时的水可视为理想流体, 黏性力可忽略不计。



要使物体在黏性流体中保持运动,就必须对物体施加一定的动力,以克服黏性阻力。黏性阻力是作用在物体上的黏性切应力的总和。黏性阻力的计算常常比较复杂。对于一些物体形状比较简单,速度比较慢的物体,流体的速度可视为线性分布的,这给计算带来很大方便。图 1.3 所示的几种在机械中常见的润滑流动,充满在运动物体和固定物体之间的润滑油的速度都可视为线性分布。

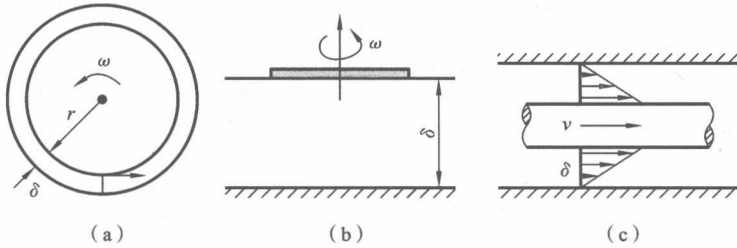


图 1.3 几种润滑流动

图 1.3(a)表示间隙为  $\delta$  的两个同心圆筒之间的黏性流动。半径为  $r$  的内筒绕其轴线转动的角速度为  $\omega$ ,紧贴内筒表面的流体的速度为  $r\omega$ ,两筒之间的流体速度呈线性分布。内筒表面受到的黏性切应力  $\tau = \mu r\omega / \delta$ 。为了维持内筒能以等角速度转动,对于单位长度(垂直于纸面)的圆柱筒所施加力矩为

$$M = \tau 2\pi r^2 = 2\pi\mu\omega r^3 / \delta$$

图 1.3(b)表示一块半径为  $r$  的圆盘浮在厚度为  $\delta$  的润滑油上,绕其对称轴以角速度  $\omega$  转动。离转轴  $r$  处,圆盘的线速度为  $r\omega$ ,流体的黏性切应力  $\tau = \mu r\omega / \delta$ 。切应力的值随  $r$  而变,施加在圆盘上的力矩用积分求出,即

$$M = \int_0^R \tau 2\pi r^2 dr = \frac{1}{2} \pi \mu \omega R^4 / \delta$$

图 1.3(c)表示一圆柱与同轴管道的相对运动,圆柱与管道之间充满黏性液体,间隙为  $\delta$ 。设长度为  $L$ 、半径为  $r$  的内管以匀速  $v$  沿轴线运动,则施加在管子上的力应为

$$F = 2\pi r L \mu v / \delta$$

## 1.5 表面张力

表面张力是液体表面出现的一种作用力。当两个流体微团之间的距离小到一定值时就会产生相互吸引力。通常把液体之间的吸引力称为内聚力,把能够产生吸引力的距离称为内聚力的影响半径。位于液体内部的液体微团受到影响半径内各个方向的内聚力而处于平衡状态。位于液体表面的微团的影响半径内,一半是液体,一半是气体,如图 1.4 所示。气体对液体的吸引力远远小于液体之间的吸引力,因此液面表层的流体微团就受到不平衡的吸引力。液体表层的吸引力如同薄膜的张力一样,

称为表面张力。表面张力的大小用表面张力系数  $\sigma$  来量度,它表示液体表面上单位长度的流体线所受到的拉力,单位是  $\text{N/m}$ 。

表面张力使液体表面有自动收缩的趋势。例如,雨滴表面是弯曲的,玻璃板上的水珠表面也是弯曲的。液体表面弯曲的曲率半径大小与液体与气体的压强差值有关。取图 1.5 所示的液体表层二维曲面的微段来分析。设表面的曲率半径为  $R$ ,微段的曲率角度为  $\Delta\alpha$ ,液体内部的压强为  $p$ ,气体的压强为  $p_0$ 。考虑曲率半径方向的力平衡,有

$$(p - p_0)R\Delta\alpha = 2\sigma\sin\frac{\Delta\alpha}{2}$$

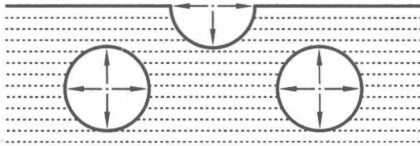


图 1.4 流体的引力球

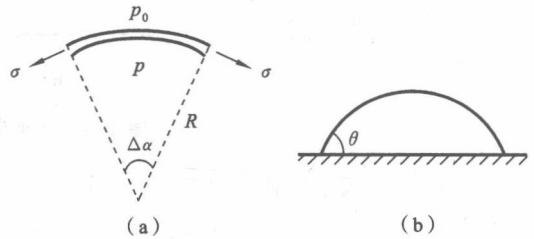


图 1.5 表面张力和接触角

对于微小角度  $\Delta\alpha$ ,角的正弦值与角度值相等,有

$$p - p_0 = \frac{\sigma}{R} \tag{1.13}$$

类似地,对于三维曲面,如果两个主曲率半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,有

$$p - p_0 = \sigma\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{1.14}$$

式(1.13)和式(1.14)都称为表面张力的拉普拉斯公式。

当液体的表面与固体壁面接触时,液体表面也是弯曲的。在液体表面和固体壁面的接触点作液体表面的切面,这个切面与固体表面在液体内部的夹角  $\theta$  称为接触角,如图 1.5(b)所示。实验表明,液体表面接触角与液体和固体之间的吸引力有关。如果液体之间的吸引力大于液体与固体之间的吸引力,则接触角为钝角,  $\theta > 90^\circ$ ,这时称液体不润湿固体。反之,如果液体之间的吸引力小于液体与固体之间的吸引力,则接触角为锐角,  $\theta < 90^\circ$ ,这时称液体润湿固体。水与玻璃的接触角  $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$ ,水银与玻璃的接触角  $\theta = 138^\circ$ 。

表面张力会引起毛细现象(见图 1.6)。将一根小直径的玻璃管插入液体中,则管内的液体表面会升高或降低。在流体力学实验中常用玻璃管作为测压管。

设液体的表面张力系数为  $\sigma$ ,接触角为  $\theta$ ,玻璃管的半径为  $r$ ,则管内液面升高或降低的高度  $h$  可利用张力与液柱重量的平衡关系求得,即

$$2\pi r\sigma\cos\theta = \rho g\pi r^2 h$$