

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材



# Engineering Fluid Mechanics

# 工程流体力学

第②版

闻建龙 © 主编



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材

# 工程流体力学

第2版

主 编 闻建龙  
参 编 王贞涛 王晓英  
主 审 罗惕乾



机械工业出版社

本书为“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

本书针对机械工程类专业的要求精选内容,围绕实际流体流动讲述流体力学基础、工程常见问题及处理方法,使读者掌握解决经常遇到的流体力学问题的方法。

本书内容主要包括:绪论,流体静力学,流体运动学基础,流体动力学基础,相似理论与量纲分析,流动阻力与水头损失,有压管路、孔口和管嘴的水力计算,黏性流体动力学基础,工程湍流及其应用,计算流体力学基础,流体力学实验技术,气体的一元流动,缝隙流动。本书章后习题附有参考答案,扫描二维码即可查看。

本书为机械类专业、能源与动力工程专业本科生教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书配有电子课件,向授课教师免费提供,需要者可登录机工教育服务网([www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com))下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/闻建龙主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2018.3  
“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材  
ISBN 978-7-111-59269-3

I. ①工… II. ①闻… 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(2018)第036117号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 李乐 任正一

责任校对:郑婕 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中国美凯印刷有限公司印刷

2018年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·332千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59269-3

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)



## 前言

流体力学是长期以来人们在利用流体的过程中逐渐形成的一门学科，起源于阿基米德对浮力的研究。流体力学是高等学校机械类专业的重要技术基础课。

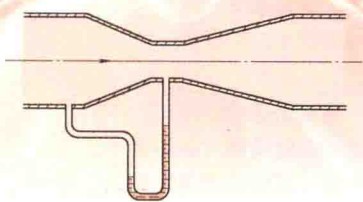
面对科学技术的迅速发展，按照“宽口径、重基础”教学改革的基本要求，本书将基本概念、基础理论与流体力学在工程技术中的应用相结合，试图提供一本讲解简练、内容丰富、特色鲜明的机械类工程流体力学教材。本书共 13 章，包括绪论，流体静力学，流体运动学基础，流体动力学基础，相似理论与量纲分析，流动阻力与水头损失，有压管路、孔口和管嘴的水力计算，黏性流体动力学基础，工程湍流及其应用，计算流体力学基础，流体力学实验技术，气体的一元流动，缝隙流动。为便于学生自主学习和复习，本书章后习题附有参考答案，扫描二维码即可查看。

本书为机械类专业、能源与动力工程专业本科生教材，也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书由江苏大学闻建龙教授主编。书中第一、二、三、四、五、六、七章由闻建龙编写，第八、九、十章由王贞涛编写，第十一、十二、十三章由王晓英编写。本书主审罗惕乾教授仔细审阅了原稿，提出了许多宝贵建议。

限于编者水平，书中错误和不妥之处恳请读者给予批评指正。

编者

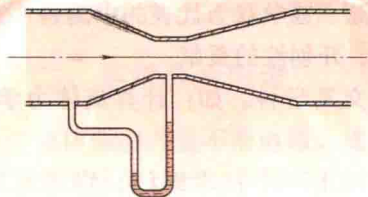


# 目录

前言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
本章要点及学习要求 .....	1
第一节 概述 .....	1
第二节 连续介质假设 .....	2
第三节 作用在流体上的力 .....	3
第四节 流体的主要物理性质 .....	4
第五节 流体的黏性 .....	7
习题 .....	11
<b>第二章 流体静力学</b> .....	12
本章要点及学习要求 .....	12
第一节 流体静压强及其特性 .....	13
第二节 流体平衡的微分方程 .....	13
第三节 流体静力学基本方程 .....	16
第四节 绝对压强、计示压强和液柱式 测压计 .....	19
第五节 液体的相对平衡 .....	22
第六节 平衡液体对壁面的作用力 .....	23
习题 .....	27
<b>第三章 流体运动学基础</b> .....	31
本章要点及学习要求 .....	31
第一节 描述流体运动的两种方法 .....	31
第二节 流体运动的基本概念 .....	33
第三节 连续性方程 .....	38
第四节 流体微团的运动分析 .....	41
习题 .....	46
<b>第四章 流体动力学基础</b> .....	48
本章要点及学习要求 .....	48
第一节 理想流体的运动微分方程 .....	48
第二节 伯努利方程 .....	50
第三节 动量方程 .....	56
第四节 动量矩方程 .....	59
习题 .....	60
<b>第五章 相似理论与量纲分析</b> .....	63
本章要点及学习要求 .....	63
第一节 相似理论 .....	63
第二节 量纲分析 .....	72
习题 .....	76
<b>第六章 流动阻力与水头损失</b> .....	78
本章要点及学习要求 .....	78
第一节 流体运动的两种流动状态 .....	79
第二节 圆管中的层流 .....	82
第三节 圆管中的湍流 .....	85
第四节 管路中的沿程水头损失 .....	88
第五节 管路中的局部水头损失 .....	92
习题 .....	94
<b>第七章 有压管路、孔口和管嘴的水力         计算</b> .....	97
本章要点及学习要求 .....	97
第一节 有压管路的水力计算 .....	97
第二节 管路中的水击 .....	104
第三节 孔口与管嘴出流 .....	108
习题 .....	111
<b>第八章 黏性流体动力学基础</b> .....	114
本章要点及学习要求 .....	114
第一节 黏性流体运动微分方程 .....	114



第二节 N-S 方程的精确解 .....	118	<b>第十一章 流体力学实验技术</b> .....	164
第三节 边界层概念 .....	119	本章要点及学习要求 .....	164
第四节 层流边界层的微分方程 .....	121	第一节 流动参数测量 .....	164
第五节 边界层动量积分关系式 .....	122	第二节 流动显示技术 .....	172
第六节 平板边界层的近似计算 .....	123	第三节 流体力学实验设备 .....	176
第七节 曲面边界层的分离及阻力 .....	128	习题 .....	179
习题 .....	130	<b>第十二章 气体的一元流动</b> .....	180
<b>第九章 工程湍流及其应用</b> .....	132	本章要点及学习要求 .....	180
本章要点及学习要求 .....	132	第一节 热力学基础知识 .....	180
第一节 湍流的定义及分类 .....	132	第二节 声速和马赫数 .....	182
第二节 时均运算法则及指标表示法 .....	134	第三节 可压缩气体一元流动基本方程 .....	186
第三节 雷诺方程 .....	136	第四节 一元恒定等熵气流的基本特性 .....	188
第四节 零方程模型 .....	139	第五节 一元等熵气流在变截面管道中的 流动 .....	191
第五节 一方程模型 .....	141	习题 .....	195
第六节 $k-\varepsilon$ 两方程模型 .....	142	<b>第十三章 缝隙流动</b> .....	197
习题 .....	146	本章要点及学习要求 .....	197
<b>第十章 计算流体力学基础</b> .....	147	第一节 平行平面缝隙与同心环形缝隙 .....	197
本章要点及学习要求 .....	147	第二节 偏心环形缝隙 .....	202
第一节 概述 .....	147	第三节 平行圆盘缝隙 .....	204
第二节 通用微分方程 .....	149	第四节 倾斜平面缝隙 .....	206
第三节 有限差分法 .....	150	习题 .....	208
第四节 有限体积法 .....	156	<b>参考文献</b> .....	211
习题 .....	162		



# 第一章

## 绪 论

### 本章要点及学习要求

**本章要点：**对流体力学及课程做概述，介绍流体的概念、流体的主要物理性质，分析作用在流体上的力。连续介质模型和流体的黏性是本章的重点。

**学习要求：**基本概念有流体质点、理想流体、连续介质假设。作用力有质量力、表面力等。主要物理性质有密度、比体积、相对密度、压缩性、膨胀性、黏性、表面张力等。流体的分类有理想流体、黏性流体，可压缩流体、不可压缩流体，牛顿流体、非牛顿流体等。基本理论及计算有牛顿内摩擦定律及实际工程问题计算。

### 第一节 概 述

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。

#### 一、流体力学的发展简史

流体力学和其他自然科学一样，是随着生产实践而发展起来的。如相传四千多年前的大禹治水，表明我国古代进行过大规模的治河防洪工程。公元前 256—公元前 210 年间（秦代）修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程，说明当时对明渠流动和堰流已有了一定的认识。通常认为，流体力学起源于阿基米德（Archimedes）在公元前 250 年对浮力的研究。

流体力学的初步形成是在 17 世纪，1653 年帕斯卡（B. Pascal）发现了静止液体的压强可以均匀地传遍整个流场，即帕斯卡定律。1687 年牛顿（I. Newton）分析了运动平板在普通流体中所受的流体阻力，提出了切应力与速度梯度成正比的关系，即牛顿内摩擦定律。1738 年伯努利（D. Bernoulli）对管道流动进行了大量的观察和测量，提出了伯努利方程。1755 年欧拉（L. Euler）提出了理想流体的运动微分方程。1823 年纳维（L. Navier）、1845 年斯托克斯（G. Stokes）分别采用不同的方法建立了黏性流体运动的微分方程。从此流体力学得到了迅速发展。

现代意义上的流体力学形成于 20 世纪初，以普朗特（L. Prandtl）的边界层理论为标

志, 卡门 (V. Karman) 和泰勒 (C. Taylor) 等一批流体力学家在空气动力学、湍流和旋涡理论等方面的卓越成就奠定了现代流体力学的基础。以周培源、钱学森为代表的中国科学家在湍流理论、空气动力学等许多重要领域内也做出了基础性、开创性的贡献。

20 世纪 60 年代以后, 流体力学出现了许多新的分支和交叉学科。如: 计算流体力学、两相流体力学、生物流体力学等。

生产的发展和需要是流体力学发展的动力。今天很难找出一个技术部门, 它的发展能够与流体力学无关。除了航空、航海、水利之外, 动力、机械、燃烧、冶金、市政、建筑、环境、医学等部门都存在大量的流体力学问题有待深入研究。例如: 动力工程中流体的能量转换, 机械工业中的润滑、液压传动, 燃烧中的空气动力特性, 冶金中高温液态金属在炉内或铸模内的流动, 市政工程中的给水排水, 高层建筑的风载, 环境工程中污染物在大气中的扩散, 血液在人体中的流动等, 这些都是工程技术领域经常遇到的流体力学问题。

## 二、流体力学的研究方法

流体力学的研究方法一般分为理论分析、实验研究和数值模拟。

理论分析是根据工程实际中流动现象的特点, 建立描述流体运动的基本方程及定解条件, 运用各种数学方法求出方程的解。理论分析的关键在于提出理论模型 (数学模型), 并运用数学方法求出揭示流体运动规律的理论结果。但由于数学上的困难, 许多实际流动问题还难于精确求解。

实验研究在流体力学中占有极其重要的地位, 它是理论分析结果正确与否的检验。实验研究是通过在具体流动的观测, 来认识流体运动的规律。流体力学的实验研究主要包括原型观测、系统实验和模型实验, 以模型实验为主。

数值模拟又称数值实验, 是伴随现代计算机技术及其应用而出现的一种方法。它采用有限差分法、有限单元法、有限体积法等, 将流体力学中一些难于用解析方法求解的理论模型离散为数值模型, 用计算机求得定量描述流体运动规律的数值解。

## 第二节 连续介质假设

### 一、流体的定义和特征

物质常见的存在状态是固态、液态和气态, 分别称为固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。

通常将流动的物质称为流体, 如水、空气、汽油等常见的物质均属于流体。从力学的角度将流体定义为: 在任何微小剪力的持续作用下, 能够连续不断变形 (流动) 的物质。流体在剪力作用下将发生连续不断的变形运动, 直至剪力消失为止, 这种性质称为流体的易流动性。

流体与固体的主要区别在于: 固体在静止状态下能抵抗拉力、压力、剪力, 当受到外力作用时, 将产生相应的变形以抵抗外力。而静止的流体不能抵抗无论多么小的拉力和剪力。液体和气体都具有易流动性, 但气体比液体更容易变形 (流动), 这是因为气体的分子分布



比液体稀疏得多（即其分子间距大，分子间引力小），而且气体还存在体积的易变性。此外液体通常存在自由表面，这是固体和气体所没有的。

## 二、连续介质假设

流体是由大量不断地做无规则热运动的分子所组成的，从微观角度以离散的分子为对象来研究流体的运动将是极其复杂的。

流体力学研究的并不是个别分子的微观运动，而是流体的宏观运动特性，如速度、压强、温度等，即大量分子运动的统计平均特性。因此在流体力学中，引入流体质点的概念，把流体看成是由连续分布的流体质点所组成的连续介质。

### 1. 流体质点

流体质点可看成含有大量分子并能保持其宏观力学特性的一个微小体积，并认为组成流体的最小物理单元是流体质点，而不是流体分子。

现以密度为例说明流体质点的概念。在流体中任一点  $A(x, y, z)$  处取  $\Delta V$  的微小体积，其质量为  $\Delta m$ （图 1-1），则其密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

$\Delta V \rightarrow 0$  理解为一个很小的值（微小体积）。

在标准状态下， $1\text{mm}^3$  体积中含有  $2.7 \times 10^{16}$  个空气分子。例如  $10^{-6}\text{mm}^3$ （一粒灰尘）的体积，比工程中常见的物体尺寸小得多，但仍由大量的分子组成，空气还有  $2.7 \times 10^{10}$  个分子。把这种宏观上足够小（ $10^{-6}\text{mm}^3$ ）、微观上足够大（ $2.7 \times 10^{10}$  个空气分子）的微小体积称为流体质点。

流体质点的数学描述为：在流体中任一点  $A(x, y, z)$  处取一个流体微团  $\Delta V$ ，当  $\Delta V \rightarrow 0$  时，这个流体微团趋于点  $A$ ，称为流体质点（图 1-1）。通常把流体中的一个微小体积称为流体微团，当流体微团的体积趋近于零时，成为流体质点。

### 2. 连续介质假设

流体是由无数连续分布的流体质点所组成的连续介质，称为连续介质假设。这一假设是流体力学中基本假设之一，由欧拉于 1755 年提出。

引进了连续介质假设以后，流体质点宏观运动的物理量（如速度、密度、压强等）都可以表示成空间坐标和时间的连续函数，数学表达式为

$$v = v(x, y, z, t), \quad \rho = \rho(x, y, z, t), \quad p = p(x, y, z, t)$$

从而可用连续函数等数学工具来研究流体的平衡和运动规律。

流体作为连续介质的假设，对一般工程实际问题都是适用的。但对于某些特殊问题，如航天器在高空稀薄空气中飞行时，气体的分子间距与航天器的尺寸可以比拟，此时不能采用连续介质假设，需要用分子动力论的微观方法研究。

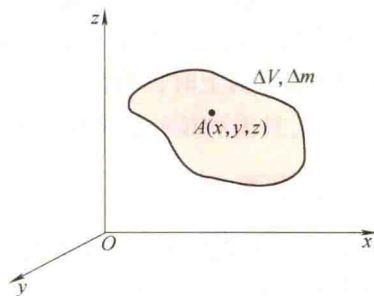


图 1-1 流体微团和流体质点

## 第三节 作用在流体上的力

作用在流体上的力有重力、惯性力、摩擦力、压力等，按作用特点的不同，分为质量力

和表面力两类。

## 一、质量力

质量力集中作用在流体各质点（或微团）上，大小与流体质量成正比。对于均质流体，质量力的大小也与流体的体积成正比，又称体积力。常见质量力有重力、惯性力等，常用单位质量力表示，即

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{F}}{m} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k}$$

式中， $\mathbf{F}$  为作用在流体上的质量力； $m$  为流体质量； $\mathbf{f}$  为单位质量力； $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  为单位质量力在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向上的分量，称单位质量分力。

若作用在流体上的质量力只有重力  $\mathbf{G} = m\mathbf{g}$ ，当坐标轴  $z$  铅直向上时，单位质量分力为

$$f_x = 0, \quad f_y = 0, \quad f_z = -g$$

## 二、表面力

表面力直接作用在流体表面上，其大小与所作用的表面积成正比。例如大气压力、水压力与摩擦力等都是表面力。

表面力常用单位面积上的力即应力表示，如图 1-2 所示。任一点  $B(x, y, z)$  的法向应力（或正应力） $\sigma$  和切应力  $\tau$  分别表示为

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}, \quad \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A}$$

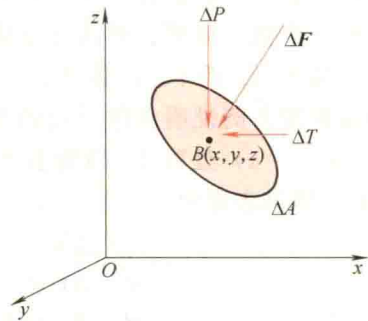


图 1-2 作用在流体上的表面力

# 第四节 流体的主要物理性质

## 一、流体的密度、比体积和相对密度

### 1. 密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，用  $\rho$  表示。对均质流体，即

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

式中， $m$  为流体的质量（kg）； $V$  为流体的体积（ $\text{m}^3$ ）； $\rho$  为密度（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）。

流体的密度一般与流体的种类、压强和温度有关。对于液体，密度随压强和温度的变化很小，可视为常数。通常水的密度为  $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，水银的密度为  $13.59 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 2. 比体积

流体密度的倒数称为流体的比体积，即单位质量流体所具有的体积。用  $v$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ，即

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

通常水的比体积为  $0.001\text{m}^3/\text{kg}$ ，水银的比体积为  $7.4\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{kg}$ 。

### 3. 相对密度

某一液体的密度  $\rho$  与温度为  $4^\circ\text{C}$  蒸馏水的密度  $\rho_w$  的比值称为相对密度，用  $d$  表示，即

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

通常水的相对密度为 1，水银的相对密度为 13.59。

对于非均质的流体，如图 1-1 所示，围绕  $A$  点取一流体微团  $\Delta V$ ，其质量为  $\Delta m$ 。当  $\Delta V \rightarrow 0$  时， $A$  点处的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

## 二、流体的压缩性和膨胀性

如果温度不变，流体的体积随压强的增加而缩小的性质，称为流体的压缩性。如果压强不变，流体的体积随温度的升高而增大的性质，称为流体的膨胀性。

### 1. 压缩性

流体的压缩性通常以体积压缩率  $\kappa$  来表示，表示当温度保持不变时，单位压强增量引起的流体体积相对变化量（图 1-3）。即

$$\kappa = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{-\Delta V/V}{\Delta p} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-4)$$

$\kappa$  的单位为  $\text{Pa}^{-1}$ （或  $\text{m}^2/\text{N}$ ）。由于当  $\Delta p$  为正值时， $\Delta V$  必为负值，故式（1-4）加一负号，以保证  $\kappa$  为正值。体积压缩率越小，流体越不容易压缩。

体积压缩率  $\kappa$  的倒数称为流体的体积模量（或为体积弹性模量），用  $K$  表示，即

$$K = \frac{1}{\kappa} \quad (1-5)$$

$K$  的单位为  $\text{Pa}$ （或  $\text{N}/\text{m}^2$ ）。体积模量越大，说明流体越不容易压缩。通常液体的压缩性很小，可以忽略不计。

### 2. 膨胀性

流体的膨胀性通常用体膨胀系数  $\alpha_V$  来表示，表示当压强不变时，单位温度升高所引起的流体体积相对变化量（图 1-4）。即

$$\alpha_V = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-6)$$

水在  $20^\circ\text{C}$ 、1 个大气压下的体积压缩率  $\kappa = 0.46 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{N}$ ，体积模量  $K = 2.17 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ ，体膨胀系数  $\alpha_V = 1.5 \times 10^{-4} \text{C}^{-1}$ 。可见水的体积压缩率和体膨胀系数都很小，在工程中通常可不考虑。



图 1-3 流体在等温下的体积压缩

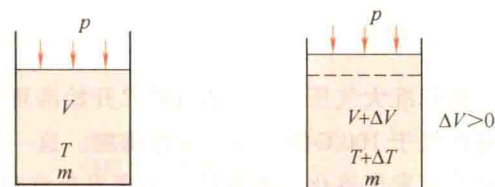


图 1-4 流体在定压下的体积膨胀

### 三、不可压缩流体

为了研究问题方便，将体积压缩率和体膨胀系数等于零的流体称为不可压缩流体。这种流体受压后体积不减小，受热后体积不膨胀。因而其密度、比体积和相对密度均为常数。

液体的可压缩性很小，在通常情况下，可忽略液体的压缩性和膨胀性，作为不可压缩流体处理。例如在水中爆炸、管道内发生水击等极少数情况下，才考虑水的压缩性。

一般情况下需考虑气体的压缩性。当常温下空气的运动速度低于  $70\text{m/s}$  时，密度相对变化量小于  $2\%$ ，可以按不可压缩流体处理。

### 四、完全气体状态方程

同时考虑压强和温度对气体体积和密度的影响，需用完全气体状态方程，即

$$pv = RT \quad \text{或} \quad \frac{p}{\rho} = RT \quad (1-7)$$

式中， $p$  为气体的绝对压强 (Pa 或  $\text{N/m}^2$ )； $v$  为气体的比体积 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )； $R$  为气体常数 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]； $T$  为热力学温度 (K)。

在一般工程条件下，完全气体状态方程对常用气体也适用。

### 五、液体的表面张力和毛细管现象

当液体与气体接触时，在分界面上会产生表面张力，液体的自由表面似拉紧的弹性薄膜，如空气中的雨滴呈球状等。表面张力表示自由表面单位长度上的拉力，用  $\sigma$  表示，单位为  $\text{N/m}$ 。

将一根内径较小的玻璃管插入液体中，管内液面会升高或降低，这种现象称为毛细管现象，毛细管现象是由表面张力所引起的，如图 1-5 所示。用玻璃管做测压管时，应考虑毛细管现象。

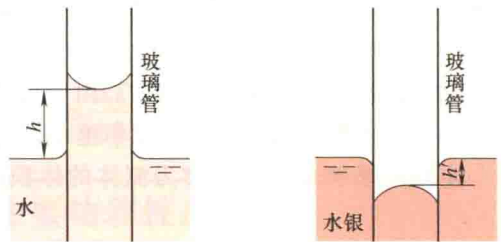


图 1-5 毛细管现象

### 六、汽化压强

在标准大气压下，水在  $100^\circ\text{C}$  开始沸腾称为汽化。当大气压强降低时（如在高原地区），水将在低于  $100^\circ\text{C}$  的温度下开始沸腾。这一现象表明，当作用于水的压强降低时，水可在较低温度下发生汽化。水在某一温度发生汽化时的绝对压强称为饱和蒸汽压强或汽化压强。液体的汽化压强与温度有关，水的汽化压强值见表 1-1。

当液体某处的压强低于汽化压强时，液体将发生汽化，形成空化现象，将对液体运动和液体与固体相接触的壁面均产生不良影响，因此在工程中应当避免空化现象的发生。

表 1-1 水的汽化压强值

水温/ $^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30
汽化压强/kPa	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24
水温/ $^\circ\text{C}$	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强/kPa	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

## 第五节 流体的黏性

黏性是流体重要特性之一，可通过一个简单的实验来观察流体的黏滞现象。在图 1-6 中，两个圆盘上下放置，靠得很近但不接触，用电动机带动下面的圆盘旋转。当下圆盘旋转后，发现上面的圆盘也慢慢地开始旋转，但转速远小于下圆盘 ( $\omega' < \omega$ )。

下圆盘与上圆盘并没有接触，上圆盘却会跟着下圆盘转动，这是因为两圆盘之间的空气具有一定的黏性，能传递摩擦力使上圆盘转动。

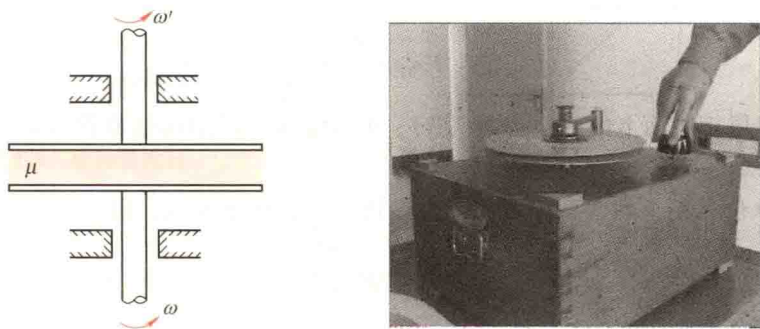


图 1-6 空气黏性实验

### 一、流体的黏性

黏性是流体抵抗剪切变形的一种属性，是流体运动时内部流体之间产生切应力（内摩擦力）的性质。

用牛顿平板实验来说明流体的黏性（图 1-7），在相距为  $h$  的两平行平板之间充满流体，下平板固定，上平板在力  $F$  作用下，以匀速  $U$  沿  $x$  方向运动。

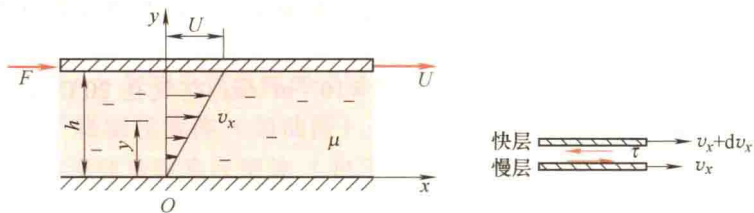


图 1-7 牛顿平板实验

由于流体与平板间有附着力，黏附于上平板的一薄层流体将以速度  $U$  跟随上平板运动，由于流体内部存在分子间的内聚力，将带动相邻的下层流体，直至传递到黏附于下平板的一薄层流体，黏附在下平板的一薄层流体与平板速度均为零。实验证明，当  $h$  较小时，两平板间流体沿  $y$  方向的速度呈线性分布，即

$$v_x = \frac{U}{h}y$$

式中,  $U/h$  为速度梯度, 通常表示为  $dv_x/dy$ 。

由于各流层速度不同, 流体层间出现相对运动, 产生的切向作用力称为内摩擦力。作用在两流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现, 且大小相等、方向相反, 分别作用在相对的流层上。

## 二、牛顿内摩擦定律

根据牛顿平板实验的结果, 作用在上平板的力  $F$  的大小与垂直于流动方向的速度梯度  $U/h$  或  $dv_x/dy$  成正比, 与接触面的面积  $A$  成正比, 并与流体的种类 (黏度  $\mu$ ) 有关, 而与接触面上的压强  $p$  无关。表达式为

$$F = \mu A \frac{dv_x}{dy}$$

式中,  $F$  为流体层接触面上的内摩擦力 (N);  $A$  为流体层间的接触面积 ( $m^2$ );  $\mu$  为流体的动力黏度 ( $Pa \cdot s$ )。

流体层间单位面积上的内摩擦力称为黏性切应力, 用  $\tau$  表示, 即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1-8)$$

式中,  $\tau$  为黏性切应力 ( $N/m^2$ )。

式 (1-8) 称为牛顿内摩擦定律。当速度梯度等于零时, 内摩擦力等于零。当流体处于静止状态或以相同速度运动 (流体层间没有相对运动) 时, 内摩擦力也等于零。

## 三、动力黏度、运动黏度

在工程计算中, 常采用动力黏度  $\mu$  和密度  $\rho$  的比值 (称为运动黏度) 来表示黏性的大小, 用  $\nu$  表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

动力黏度  $\mu$  的单位是  $Pa \cdot s$  ( $N \cdot s/m^2$ )。运动黏度  $\nu$  的单位是  $m^2/s$  或  $cm^2/s$ 、 $mm^2/s$ 。

动力黏度、运动黏度这两个名词的来源是它们的量纲, 前者有动力学量纲, 后者只有运动学量纲。

例如水在  $20^\circ C$  时,  $\mu = 1 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ,  $\nu = 1 \times 10^{-6} m^2/s$ 。空气在  $20^\circ C$  时,  $\mu = 1.83 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ,  $\nu = 1.52 \times 10^{-5} m^2/s$ 。

## 四、流体黏度的测量

流体黏度的测量方法有两种, 一种是直接测量法, 如用旋转黏度计、毛细管黏度计、落球黏度计等。另一种是间接测量法, 如用恩氏黏度计等。

### 1. 旋转黏度计

在图 1-8 中, 旋转黏度计的转子由电动机带动以一定的速度旋转, 若转子未受到液体的黏滞阻力, 则游丝、指针与刻度盘同速旋转, 指针读数为零。若转子受到液体的黏滞阻力, 则游丝产生转矩与黏滞阻力达到平衡, 指针在刻度盘上指示一定的读数 (即游丝的扭转角)。将此读数乘上仪器对应的特定系数即为液体的黏度。



## 2. 恩氏黏度计

恩氏黏度计（图 1-9）的原理是通过测定液体由某一标准孔口（ $d=2.8\text{mm}$ ），流出一定量体积所需的时间来测量黏度。黏性大的液体流得慢，黏性小的液体流得快。恩氏黏度计测得的是恩氏黏度，符号为  $E_t$ 。

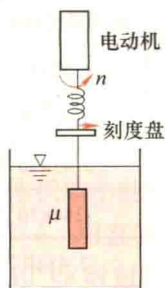


图 1-8 旋转黏度计

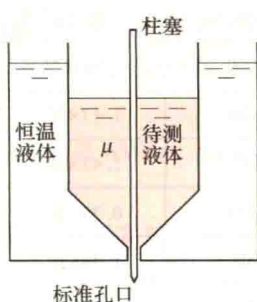


图 1-9 恩氏黏度计



在温度  $T$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）时，取 200mL 待测液体，测出从黏度计流出的时间  $t_1$ 。取 200mL 温度为  $20^{\circ}\text{C}$  的蒸馏水，测出从黏度计流出的时间  $t_2$ （ $t_2=51\text{s}$ ）。则

$$E_t = \frac{t_1}{t_2}$$

称为待测液体在温度  $T$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）时的恩氏黏度。用恩氏黏度计的经验公式

$$\nu = 0.0731E_t - 0.0631/E_t$$

可求出待测液体在温度  $T$ （ $^{\circ}\text{C}$ ）时的运动黏度（ $\text{cm}^2/\text{s}$ ）。

## 五、牛顿流体、非牛顿流体

切应力和速度梯度之间的关系符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如空气、水、汽油、酒精等。否则称为非牛顿流体，如牙膏、油漆、纸浆等。

非牛顿流体的切应力与速度梯度的关系为

$$\tau = \tau_0 + \eta \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^n \quad (1-10)$$

式中， $\tau_0$  为屈服应力； $\eta$  为非牛顿流体的表观黏度； $n$  为常数。

图 1-10 中给出了胀塑性流体（如油漆）、假塑性流体（如纸浆）和塑性流体或称宾汉流体（如牙膏）等非牛顿流体以及牛顿流体的切应力与速度梯度的关系曲线。

## 六、黏性流体、理想流体

实际流体都具有黏性，称为黏性流体，不考虑黏性的流体称为理想流体。由于黏性的存在，实际流体的运动都很复杂。为使问题简化，在流体力学中引入理想流体这一假设。

水和空气等常见流体黏性不大，在某些工程问题中

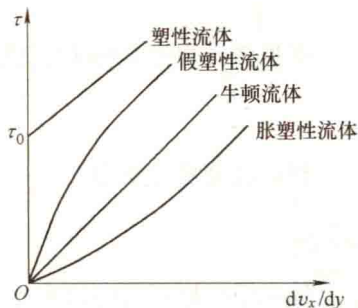


图 1-10 切应力和速度梯度的关系

作为理想流体仍可得到较满意的结果，如对于流体波浪运动与潮汐运动等的研究，但在研究物体的绕流阻力时就必须考虑流体的黏性。

标准大气压下常见液体的物理性质见表 1-2。

表 1-2 标准大气压下常见液体的物理性质

液体	温度/℃	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	比体积/(m <sup>3</sup> /kg)	体积压缩率/Pa <sup>-1</sup>	动力黏度/(Pa·s)	运动黏度/(m <sup>2</sup> /s)
蒸馏水	4	1000	1×10 <sup>-3</sup>	0.485×10 <sup>-9</sup>	1.52×10 <sup>-3</sup>	1.52×10 <sup>-6</sup>
原油	20	856	1.17×10 <sup>-3</sup>	—	7.2×10 <sup>-3</sup>	8.4×10 <sup>-6</sup>
汽油	20	678	1.47×10 <sup>-3</sup>	—	0.29×10 <sup>-3</sup>	0.43×10 <sup>-6</sup>
甘油	20	1258	0.79×10 <sup>-3</sup>	0.23×10 <sup>-9</sup>	1490×10 <sup>-3</sup>	1184×10 <sup>-6</sup>
煤油	20	808	1.24×10 <sup>-3</sup>	—	1.92×10 <sup>-3</sup>	2.4×10 <sup>-6</sup>
水银	20	13590	0.074×10 <sup>-3</sup>	0.038×10 <sup>-9</sup>	1.63×10 <sup>-3</sup>	1.2×10 <sup>-6</sup>
润滑油	20	918	1.09×10 <sup>-3</sup>	—	440×10 <sup>-3</sup>	479×10 <sup>-6</sup>
水	20	998	1.002×10 <sup>-3</sup>	0.46×10 <sup>-9</sup>	1.0×10 <sup>-3</sup>	1.0×10 <sup>-6</sup>
海水	20	1025	0.976×10 <sup>-3</sup>	0.43×10 <sup>-9</sup>	1.08×10 <sup>-3</sup>	1.05×10 <sup>-6</sup>
酒精	20	789	1.27×10 <sup>-3</sup>	1.1×10 <sup>-9</sup>	1.19×10 <sup>-3</sup>	1.5×10 <sup>-6</sup>

**例** 同心环形缝隙中的回转运动如图 1-11 所示，直径为  $d$  的轴在长度为  $L$  的轴承内以角速度  $\omega$  运动，带动同心缝隙中的液体做回转运动。同心缝隙  $\delta \ll d$ ，假定速度分布近似为直线规律。求轴克服摩擦所需的功率  $P$ 。

**解** 轴表面处的速度为

$$U = \omega \frac{d}{2}$$

速度梯度为

$$\frac{dv}{dr} = \frac{U}{\delta} = \frac{\omega d}{2\delta}$$

切应力为

$$\tau = \mu \frac{dv}{dr} = \frac{\mu \omega d}{2\delta}$$

摩擦表面积为  $A = \pi L d$ ，缝隙中液体作用在轴表面上的摩擦力为

$$F = \tau A = \frac{\pi \mu L d^2 \omega}{2\delta}$$

相应的摩擦力矩为

$$M = F \frac{d}{2} = \frac{\pi \mu L d^3 \omega}{4\delta}$$

轴克服摩擦所需的功率为

$$P = M\omega = FU = \frac{\pi \mu L d^3 \omega^2}{4\delta}$$

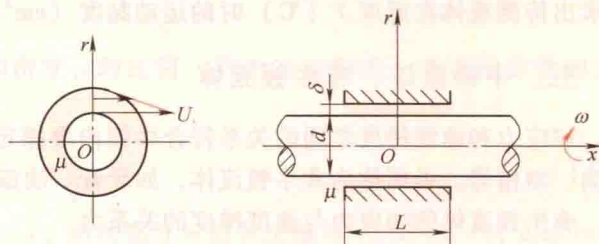


图 1-11 同心环形缝隙中的回转运动



## 习 题

1-1 某种油的密度为  $\rho = 856 \text{ kg/m}^3$ ，运动黏度为  $\nu = 8.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，求动力黏度  $\mu$ 。

1-2 存放  $4 \text{ m}^3$  液体的储液罐，当压强增加  $0.5 \text{ MPa}$  时，液体体积减小  $1 \text{ L}$ ，求液体的体积模量  $K$ 。

1-3 压缩机向气罐充气，绝对压强从  $0.1 \text{ MPa}$  升到  $0.6 \text{ MPa}$ ，温度从  $20^\circ\text{C}$  升到  $78^\circ\text{C}$ ，求空气体积缩小的百分数。

1-4 用直径  $d = 400 \text{ mm}$ 、长  $L = 2000 \text{ m}$  的输水管做水压实验，当输水管内水的压强加至  $7.5 \times 10^6 \text{ Pa}$  时封闭， $1 \text{ h}$  后由于泄漏，压强降至  $7.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，不计输水管的变形，水的体积压缩率为  $0.46 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ，求水的泄漏量  $\Delta V$ 。

1-5 面积为  $A = 1.5 \text{ m}^2$  的薄板在液面上水平移动，速度  $U = 16 \text{ m/s}$ ，液层厚度  $\delta = 4 \text{ mm}$ ，假定沿垂直方向速度为直线分布，如图 1-12 所示。求当液体分别为  $20^\circ\text{C}$  的水 ( $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) 和温度为  $20^\circ\text{C}$ 、密度为  $856 \text{ kg/m}^3$  的原油 ( $\nu = 8.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) 时，移动平板所需的力  $F$ 。

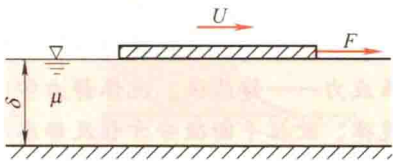


图 1-12 题 1-5 图

1-6 在图 1-13 中，相距  $\delta = 40 \text{ mm}$  的两平行平板间充满动力黏度  $\mu = 0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的液体，液体中有一边长  $a = 60 \text{ mm}$  的正方形薄板，以  $v_0 = 15 \text{ m/s}$  的速度水平运动，由于黏性带动液体运动，假设沿垂直方向速度为直线分布。

求：1) 当  $h = 10 \text{ mm}$  时，薄板运动受到的液体阻力  $F$ 。

2) 如果  $h$  可改变， $h$  为多大时，薄板的阻力最小？并计算其最小阻力值  $F$ 。

1-7 在图 1-14 中，直径  $d = 76 \text{ mm}$  的轴在同心缝隙  $\delta = 0.03 \text{ mm}$ 、长度  $L = 150 \text{ mm}$  的轴承中旋转，轴的转速为  $n = 226 \text{ r/min}$ ，测得轴颈上的摩擦力矩为  $M = 76 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，求缝隙中油液的动力黏度  $\mu$ 。

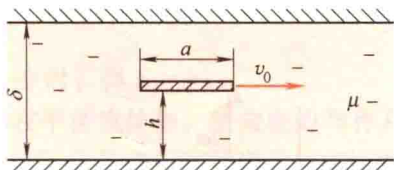


图 1-13 题 1-6 图

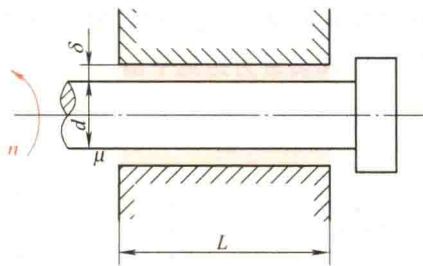


图 1-14 题 1-7 图



[ 参考答案 ]