

普通高等教育“十三五”规划教材



# 流体力学与 流体机械

王贞涛 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

# 流体力学与流体机械

主编 王贞涛

参编 闻建龙 王军锋 王晓英

主审 罗惕乾



机械工业出版社

本书根据高等院校工科类流体力学与流体机械的教学大纲编写而成,围绕实际流动讲述流体力学基础、泵与风机理论、工程常见问题及其处理方法,力求使读者掌握解决常见流体力学与流体机械相关问题的知识。

本书主要内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学与动力学基础,相似理论与量纲分析,黏性不可压缩流体的管内流动,黏性流体动力学,流体力学实验技术;泵与风机概述,叶片式泵与风机的理论基础,泵与风机的相似理论,泵的汽蚀,泵与风机的运行、调节及选型,其他常用泵与压缩机。

本书可作为高等院校能源与动力工程、建筑环境与设备工程、环境与安全工程、机械工程等专业的本科生教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

流体力学与流体机械/王贞涛主编. —北京:机械工业出版社, 2015. 8  
普通高等教育“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-111-50906-6

I. ①流… II. ①王… III. ①流体力学—高等学校—教材②流体力学—机械—高等学校—教材 IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第164794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 李超 宋学敏

版式设计:赵颖喆 责任校对:肖琳

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2015年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·370千字

标准书号:ISBN 978-7-111-50906-6

定价:30.00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

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网: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，起源于人类对空气、水等物质的认识。流体机械中的泵与风机是通用机械，在国民经济各个部门中有着广泛的应用，其耗电量占全国总用电量的30%。流体力学、泵与风机是高等院校众多专业的必修课程，是工程技术人员必备的专业知识之一。

本书是作者根据多年的教学实践经验，并结合国内高等院校人才培养目标和课程改革的实际需要编写而成。本书具有以下特点：①流体力学部分突出了流体力学基本方程讲解的条理性，遵循由浅入深的基本原则；②流体机械部分突出了泵与风机的基本原理与应用，不涉及复杂的设计问题；③将流体力学常见的实验技术和方法单独列为一章，力求突出实验方法与技术 in 流体力学中的地位；④内容较为丰富，涉及流体力学、泵与风机，为教师提供了可选择的余地，也为学生学习提供了充分的空间。总之，本书既注重基础理论知识，又重视与工程技术的紧密结合。

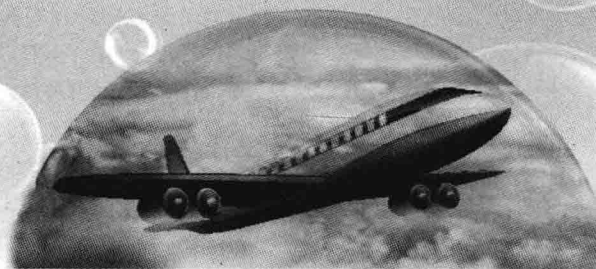
本书可作为高等院校能源与动力工程、建筑环境与设备工程、环境与安全工程、机械工程等专业的本科生教材，也可作为有关工程技术人员的参考用书。

本书由江苏大学王贞涛主编。书中第一、六、七、九、十章由王贞涛编写，第四、五、八、十一章由闻建龙编写；第三、十二章由王军锋编写；第二、十三、十四章由王晓英编写。本书由江苏大学罗惕乾教授担任主审，罗教授仔细审阅了本书，提出了许多宝贵的建议，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者  
于江苏大学

# 目 录



## 前言

第一章 绪论 .....	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 .....	4
第四节 流体的主要物理性质 .....	5
第五节 流体的黏性 .....	7
第六节 液体的表面性质 .....	11
习题 .....	13
第二章 流体静力学 .....	15
第一节 流体静压强及其特性 .....	15
第二节 流体平衡的微分方程 .....	16
第三节 流体静力学基本方程式 .....	19
第四节 绝对压强、计示压强和液柱式 测压计 .....	21
第五节 液体的相对平衡 .....	24
第六节 平衡流体对壁面的作用力 .....	26
第七节 浮体和潜体的稳定性 .....	29
习题 .....	31
第三章 流体运动学基础 .....	34
第一节 描述流体运动的两种方法 .....	34
第二节 流体运动的基本概念 .....	36
第三节 连续性方程 .....	41
第四节 流体微团的运动 .....	44
第五节 速度势函数和流函数 .....	49
习题 .....	53

第四章 流体动力学基础 .....	55
第一节 理想流体的运动微分方程 .....	55
第二节 伯努利方程 .....	57
第三节 动量方程 .....	62
第四节 动量矩方程 .....	65
习题 .....	66
第五章 相似理论与量纲分析 .....	69
第一节 相似理论 .....	69
第二节 量纲分析 .....	77
习题 .....	80
第六章 黏性不可压缩流体的管内 流动 .....	82
第一节 黏性流体的两种流动状态 .....	82
第二节 圆管中的层流 .....	84
第三节 圆管中的湍流 .....	86
第四节 流动阻力与能量损失 .....	89
第五节 管路的水力计算 .....	97
第六节 管路中的水击 .....	103
第七节 孔口与管嘴出流 .....	107
习题 .....	111
第七章 黏性流体动力学 .....	113
第一节 不可压缩黏性流体运动微分方 程(纳维-斯托克斯方程) .....	113
第二节 N-S 方程的精确解 .....	118
第三节 边界层的基本概念 .....	121



第四节 层流边界层的微分方程·····	122	第八节 泵的性能试验·····	191
第五节 边界层动量积分关系式·····	124	习题·····	194
第六节 平板边界层的近似计算·····	125	<b>第十一章 泵与风机的相似理论</b> ·····	195
第七节 边界层分离及减阻·····	132	第一节 泵与风机的相似条件·····	195
第八节 绕圆柱体的流动·····	135	第二节 泵与风机的相似定律·····	196
第九节 湍流概述·····	137	第三节 比转数·····	199
第十节 雷诺方程·····	140	第四节 泵与风机的无量纲性能	
第十一节 湍流模式理论·····	143	曲线·····	201
习题·····	147	第五节 通用性能曲线·····	203
<b>第八章 流体力学实验技术</b> ·····	149	习题·····	204
第一节 流动参数测量·····	149	<b>第十二章 泵的汽蚀</b> ·····	205
第二节 流动显示技术·····	157	第一节 汽蚀现象及其影响·····	205
第三节 流体力学实验设备简介·····	162	第二节 泵吸上真空高度·····	206
习题·····	165	第三节 泵汽蚀余量·····	208
<b>第九章 泵与风机概述</b> ·····	166	第四节 汽蚀相似定律及汽蚀比	
第一节 泵的用途与分类·····	166	转数·····	210
第二节 叶片式泵的主要部件和结构		第五节 叶片式泵的汽蚀试验·····	212
形式·····	168	习题·····	213
第三节 叶片式风机的主要部件和结构		<b>第十三章 泵与风机的运行、调节及</b>	
形式·····	170	<b>选型</b> ·····	214
习题·····	173	第一节 管路性能曲线及工作点·····	214
<b>第十章 叶片式泵与风机的理论</b>		第二节 泵与风机的联合工作·····	217
<b>基础</b> ·····	174	第三节 泵与风机的工况调节·····	219
第一节 工作原理·····	174	第四节 泵与风机的选型·····	222
第二节 性能参数·····	175	习题·····	226
第三节 离心式泵与风机的叶轮		<b>第十四章 其他常用泵与压缩机</b> ·····	227
理论·····	177	第一节 其他常用泵·····	227
第四节 叶型及其对泵与风机性能的		第二节 压缩机·····	230
影响·····	181	习题·····	233
第五节 泵与风机的性能曲线·····	182	<b>参考文献</b> ·····	234
第六节 轴流式泵与风机的叶轮			
理论·····	186		
第七节 贯流式风机·····	190		





# 第一章

## 绪 论

### 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。自然界物质存在的主要形式是固体、液体和气体，液体和气体统称为流体。从力学角度看，流体和固体的主要差别在于抵抗外力的能力不同。固体可以抵抗拉力、压力和剪力，而流体则几乎不能承受任何形式的拉力，处于平衡状态的流体还不能抵抗剪力，即流体在很小的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，流体的这种宏观力学特性称为易流动性。易流动性也是流体区别于固体的根本标志。流体包括气体和液体，两者的主要差别在于气体易于压缩，而液体难于压缩。

#### 一、流体力学的发展

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。相传四千多年以前的大禹治水，表明我国古代进行过大规模的治河防洪工作。秦代在公元前 256 ~ 公元前 210 年间修建了都江堰、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。一般认为，古希腊的阿基米德（Archimedes）于公元前 250 年提出的浮力定律标志着流体力学研究的开端。

近代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，即帕斯卡原理。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。1738 年，伯努利（D. Bernoulli）对管道流动进行了大量的观察和测量，提出了伯努利定理。1755 年，欧拉（L. Euler）提出了无黏性流体的运动方程。纳维（L. Navier）和斯托克斯（G. G. Stokes）分别于 1823 年、1845 年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的发展。

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，还有卡门（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。

在科学技术发达的今天，流体力学所研究的问题更加广泛深入，出现了许多新的分支和交叉学科，并且派生出很多分支，形成许多边缘学科，例如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、高温流体力学、计算流体力学、非牛顿流体力学、流变学等。这些新兴学科的出现和发展，使流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

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与非定常流动，机械工业中的润滑、液压传动，燃烧中的空气动力学特性，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

流体力学借鉴了一般力学的研究方法，即理论分析、实验研究和数值计算的方法。

理论分析是根据工程实际中流动现象的特点，依据物理学中的质量守恒、动量守恒与能量守恒，建立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标准。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，而以模型实验为主。

数值模拟又称数值计算，是伴随现代计算机技术及其应用而出现的一种方法。它广泛采用有限差分法、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。

以上三种方法相互结合，为发展流体力学理论和解决复杂的流体力学问题奠定了基础。

## 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，与其相对应的分别称为固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。

一般将流动的物质称为流体，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的物质。如水、空气和汽油等。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。

流体与固体的差别：固体在静止状态下能抵抗一定数量的拉力、压力和剪力。当其受到外力作用时，将产生相应的变形以抵抗这个外力。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

流体由大量不断地做无规则热运动的分子所组成，从微观角度看，分子间存在间隙，且分子不停地做随机热运动。显然，以离散的分子为对象来研究流体的运动将是极其复杂的。

流体力学所要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、压力、温度等，即大量分子运动的统计平均物理特性。因此，在流体力学中，引入流体质点的概念，并把流体看成是由连续分布的流体质点所组成的。

### 1. 流体质点

流体质点：含有大量分子并能保持其宏观力学特性的一个微小体积。流体质点的概念提出以后，可以认为组成流体的最小物理单元是流体质点，而不是流体分子或原子。

现以密度为例说明流体质点的含义。如图 1-1 所示，在流体中任一点  $A$  处取  $\Delta V$  的微小体积，质量为  $\Delta m$ ，则密度可表示为

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

$\Delta V \rightarrow 0$  不能简单地理解为数学上的趋近于零，只能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  $2.7 \times 10^{16}$  个气体分子，或含有  $3.4 \times 10^{19}$  个水分子。例如  $10^{-6}\text{mm}^3$ （一粒灰尘）的体积，比工程中常见的物体小得多，但仍由大量的分子组成。因此把这种宏观上足够小、微观上足够大的微小体积称为流体质点。

通常把流体中的一个微小体积称为流体微团。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。通常认为流体质点在几何上是一个点，体积趋于零（但不等于零）。

因此，对一般的流体力学问题，完全可以将流体视为由连续分布的流体质点所组成，而流体质点的物理性质、运动参数作为研究流体宏观运动的出发点，由此建立起流体的连续介质模型。

### 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的基本假设之一，由欧拉于 1755 年提出。

引进了连续介质假设以后，描述流体质点所具有的宏观运动的物理量（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

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(x, y, z, t), \quad \rho = \rho(x, y, z, t), \quad p = p(x, y, z, t) \quad (1-2)$$

从而可以引用连续函数的解析方法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不适

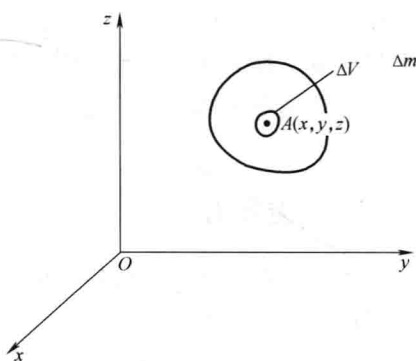


图 1-1 流体微团和流体质点



用。例如，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，不能再忽略不计，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。本书只研究满足连续介质假设的流体力学规律。

### 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，其大小与流体质量成正比。对于均质流体，其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。

设在均质流体中取一质量为  $m$ 、体积为  $V$  的流体微团，作用在微团上的质量力为  $\mathbf{F}$ ，则单位质量力  $\mathbf{f}$  为

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{F}}{m} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k} \quad (1-3)$$

式中， $\mathbf{F}$  为作用在流体上的力； $m$  为流体质量； $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为单位质量力  $\mathbf{f}$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴上的分量，称为单位质量力的分量。

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形式表示。如图 1-2 所示，任一点  $B(x, y, z)$  处的法向应力  $p$  和切向应力  $\tau$  分别表示为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_p}{\Delta A}, \quad \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_T}{\Delta A} \quad (1-4)$$

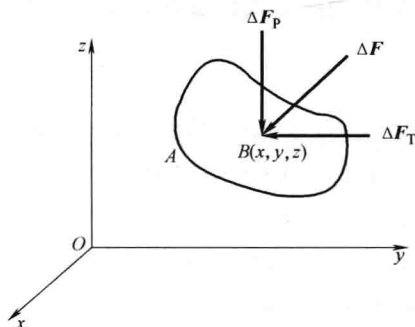


图 1-2 作用在流体上的表面力



## 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

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

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

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  $13.6 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ 。

#### 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，即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

通常，水的比体积为  $0.001\text{m}^3/\text{kg}$ ，水银的比体积为  $7.35 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{kg}$ 。

#### 3. 相对密度

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

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

通常，水的相对密度为 1，水银的相对密度为 13.6。

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

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-8)$$

### 二、流体的可压缩性和膨胀性

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可压缩性。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. 可压缩性

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

$$\kappa = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{-\Delta V/V}{\Delta p} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-9)$$

$\kappa$  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 (1-9) 加上负号，以保证  $\kappa$  为正值。体积压缩率越小，流体越不容易被压缩。

体积压缩率  $\kappa$  的倒数称为流体的体积模量，用符号  $K$  表示，即

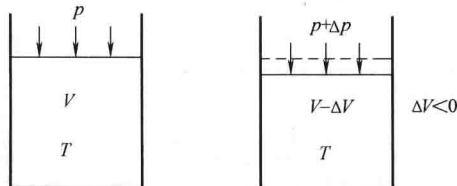


图 1-3 流体在等温下的体积压缩



$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (1-10)$$

$K$  的单位为 Pa (或  $\text{N/m}^2$ )。体积模量  $K$  越大, 说明流体越不容易被压缩。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。它表示当压强不变时, 单位温度升高所引起的流体体积相对变化量 (图 1-4), 即

$$\alpha_v = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-11)$$

水在  $20^\circ\text{C}$ 、标准大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  $K = 2.17 \times 10^9 \text{N/m}^2$ , 体膨胀系数  $\alpha_v = 1.5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。可见水的可压缩性和膨胀性都很小, 在工程中通常可不考虑。

为了研究问题的方便, 将体压缩系数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。液体的可压缩性很小, 在通常情况下, 可忽略液体的可压缩性和膨胀性, 作为不可压缩流体处理。只有在水中爆炸、管道内发生水击等极少数情况下, 才考虑水的压缩性。

有些工程问题中, 不需要考虑气体的可压缩性。常温下空气速度低于  $100\text{m/s}$  时, 气体密度相对变化值小于 3%, 可以按不可压缩流体处理。

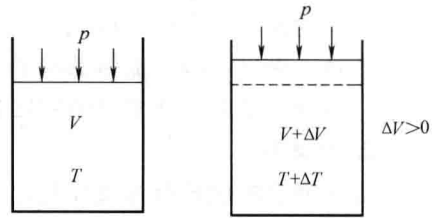


图 1-4 流体在定压下的体积膨胀

## 三、完全气体状态方程

通常情况下, 必须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

$$pv = RT \quad \text{或} \quad p/\rho = RT \quad (1-12)$$

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 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $R$  为气体状态常数 [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ];  $T$  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是适用的。

## 四、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  $100^\circ\text{C}$  的温度下开始沸腾汽化。这一现象表明作用于水的绝对压强降低时, 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。

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



当液体某处的压强低于汽化压强时,在该处发生汽化,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。

## 第五节 流体的黏性

黏性是流体的重要物理属性之一,通过一个简单的实验来观察流体的黏滞现象。如图 1-5 所示,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,发现上面的圆盘也会慢慢地开始旋转,但速度远小于下圆盘。

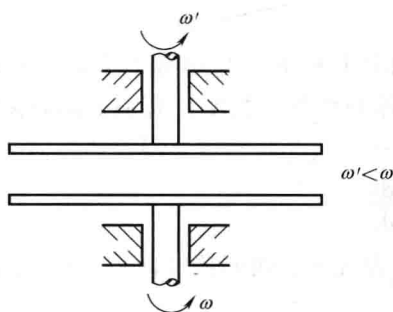


图 1-5 空气黏性实验

下圆盘与上圆盘没有接触,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。当上、下两个圆盘之间充满水时,发现当下圆盘转动速度不变时,上圆盘的旋转速度将远大于两圆盘之间充满空气的情况,说明空气与水的黏性不同。

### 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 1-6):面积为  $A$ 、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。

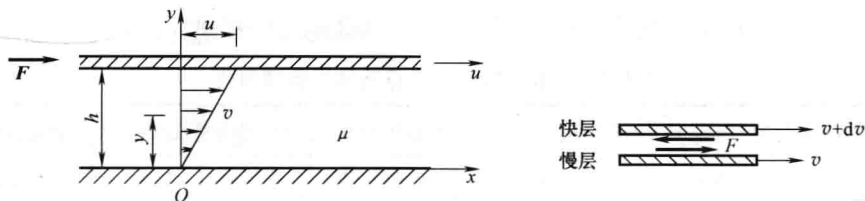


图 1-6 牛顿平板实验

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,黏附在下平板的薄层流体与平板速度均为零。实验证明,当  $h$  和  $u$  较小时,两平



板间沿  $y$  方向的流速呈线性分布, 即

$$v = \frac{u}{h}y \quad (1-13)$$

式中,  $\frac{u}{h}$  为速度梯度, 通常表示为  $\frac{dv}{dy}$ 。

由于各流层速度不同, 流层间出现相对运动产生切向作用力, 称为内摩擦力。作用在两个流体层接触面上的内摩擦力总是成对出现的, 即大小相等、方向相反, 分别作用在运动的不同的流层上。

## 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  $u/h$  成正比, 与接触面的面积  $A$  成正比, 并与流体的种类 (黏度) 有关, 而与接触面上的压强  $p$  无关。数学表达式为

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

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, 用符号  $\tau$  表示

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

式中,  $\tau$  为黏性切应力 ( $N/m^2$  或  $Pa$ )。

式 (1-15) 为牛顿内摩擦定律。当速度梯度等于零时, 内摩擦力也等于零。所以当流体处于静止状态或平衡状态 (流层间没有相对运动) 时, 内摩擦力等于零。此时流体的黏性作用无法表现出来。对于不考虑黏性 ( $\mu = 0$ ) 的理想流体, 内摩擦力等于零。

在工程计算中, 常采用动力黏度  $\mu$  和密度  $\rho$  的比值来表示黏性的大小, 该比值称为运动黏度, 用符号  $\nu$  表示

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

式中,  $\nu$  为运动黏度 ( $m^2/s$ )。

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。标准大气压下常见流体的物理属性见表 1-2。

表 1-2 标准大气压下常见液体的物理属性

液体	温度/ $^{\circ}C$	密度/ $(kg/m^3)$	比体积/ $(m^3/kg)$	体积压缩率/ $Pa^{-1}$	动力黏度/ $Pa \cdot s$	运动黏度/ $(m^2/s)$
蒸馏水	4	1000	$1 \times 10^{-3}$	$0.485 \times 10^{-9}$	$1.52 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-6}$
原油	20	856	$1.17 \times 10^{-3}$	—	$7.2 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-6}$
汽油	20	678	$1.47 \times 10^{-3}$	—	$0.29 \times 10^{-3}$	$0.43 \times 10^{-6}$
甘油	20	1258	$0.79 \times 10^{-3}$	$0.23 \times 10^{-9}$	$1490 \times 10^{-3}$	$1184 \times 10^{-6}$
煤油	20	803	$1.24 \times 10^{-3}$	—	$1.92 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-6}$
水银	20	13590	$0.074 \times 10^{-3}$	$0.038 \times 10^{-9}$	$1.63 \times 10^{-3}$	$0.12 \times 10^{-6}$





(续)

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)
润滑油	20	918	$1.09 \times 10^{-3}$	—	$440 \times 10^{-3}$	$479 \times 10^{-6}$
水	20	998	$1.002 \times 10^{-3}$	$0.46 \times 10^{-9}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-6}$
海水	20	1025	$0.976 \times 10^{-3}$	$0.43 \times 10^{-9}$	$10.8 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-6}$
酒精	20	789	$1.27 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-9}$	$1.19 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-6}$

### 三、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，如使用旋转式黏度计、毛细管黏度计、落球黏度计等进行的测量；另一种是间接测量法，如使用恩氏黏度计等进行的测量。

#### 1. 旋转式黏度计

如图 1-7 所示，旋转式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，则游丝产生扭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

恩氏黏度计的工作原理是通过测定液体经过某一标准孔口（ $d = 2.8\text{mm}$ ）流出一定量体积所需的时间来测量黏度，如图 1-8 所示。黏性大的液体流得慢，黏性小的液体流得快。恩氏黏度计所测得的是恩氏黏度，符号为  $E_1$ 。

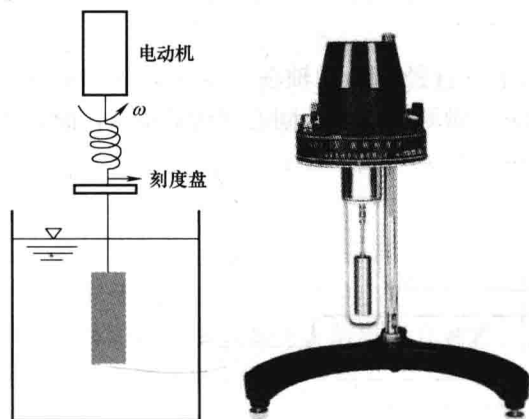


图 1-7 旋转式黏度计

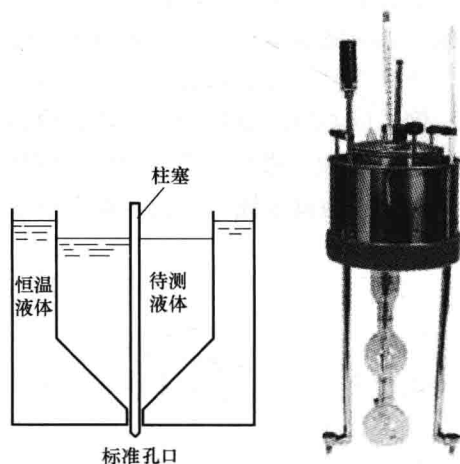


图 1-8 恩氏黏度计

在温度为  $T$ （单位为℃）时，取 200mL 待测液体，测出从黏度计流出的时间  $t_1$ ；在温度为 20℃ 时，取 200mL 蒸馏水，测出从黏度计流出的时间  $t_2$ （ $t_2 = 51\text{s}$ ），则恩氏黏度为

$$E_1 = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-17)$$

$E_1$  称为待测液体在温度  $T$ （℃）时的恩氏黏度。

根据恩氏黏度计的经验公式可求出待测液体在温度  $T$ （℃）时的运动黏度  $\nu$ （ $\text{cm}^2/\text{s}$ ）。



$$\nu = 0.0731E_1 - 0.0631/E_1 \quad (1-18)$$

#### 四、牛顿流体和非牛顿流体

凡是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；否则就称为非牛顿流体，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

$$\tau = \tau_0 + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (1-19)$$

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 1-9 中给出了胀塑性流体、假塑性流体和理想塑性流体（宾汉流体）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。

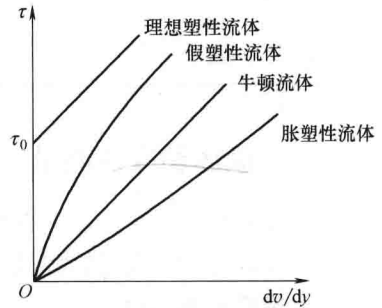


图 1-9 切应力和速度梯度的关系

#### 五、黏性流体和理想流体

自然界中存在的实际流体都具有黏性，称为黏性流体。

不考虑黏性的假想流体称为理想流体。由于黏性的存在，实际流体的运动都很复杂，使流体运动规律的研究变得十分困难。为了使问题简化，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，应用在某些工程问题中作为理想流体仍可得到较满意的结果，如对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，否则将得出与实际情况相反的结论。

**例** 同心环形缝隙中的回转运动如图 1-10 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（黏度为  $\mu$ ）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。求转轴克服摩擦所需的功率  $P$ 。

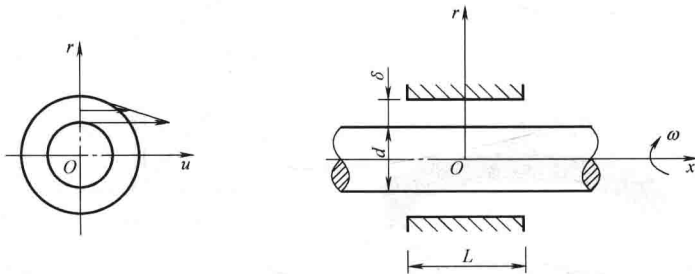


图 1-10 同心环形缝隙中的回转运动

**解：**轴表面处的速度为

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

故在轴表面处的速度梯度为

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



切应力为

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

摩擦表面积  $A = \pi Ld$ , 则流体作用在轴表面上的摩擦力为

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

缝隙中液体作用在轴表面上的摩擦力矩为

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

轴克服摩擦所需的功率为

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

## 第六节 液体的表面性质

### 一、表面张力

液体中的分子都要受到它周围分子引力的影响, 而引力的作用范围很小, 大约只有 3 ~ 4 倍的平均分子间距, 若用  $r$  来表示其大小, 显然当某分子到自由液面的距离大于或者等于  $2r$  时, 该分子受到的周围分子的引力是平衡的。当某分子到自由液面的距离小于  $2r$  时, 由于自由液面另一侧的气体分子和该分子间的引力小于液体分子对该分子的引力, 其结果使得这一分子受到一个将其拉向液体内部的合力。在到液面小于  $2r$  的范围内所有分子均受到这样一个力的作用, 其大小因到液面的距离不同而不同, 当其距离大于或等于  $2r$  时, 这一合力为零, 随着距离的减小合力逐渐增大, 当到液面的距离小于  $r$  时, 合力达到最大值。这一合力称为内聚力, 由于内聚力的作用液体自由表面有明显的呈现球形的趋势。

表面张力是由液体分子间的力引起的, 其作用使得液面好像一张紧的弹性膜。若假想一和自由液面垂直的平面将自由液面分开, 则平面两侧的自由液面彼此之间均作用着引力, 其方向沿自由液面的切线方向, 试图将液面张得更紧。作用在自由液面上的这样的力称为表面张力, 用  $\sigma$  表示, 单位为  $\text{N/m}$ 。

液体表面张力的大小和液体的种类有关, 不同的液体表面张力的大小不同。温度变化时, 表面张力的大小也要发生变化, 温度升高表面张力减小。另外, 表面张力还和自由表面上的气体种类有关。表 1-3 给出了几种常见液体和空气接触时的表面张力, 表 1-4 给出了一个标准大气压、不同温度下水和空气接触时的表面张力。

表 1-3 几种常见液体和空气接触时的表面张力

液体名称	酒精	煤油	润滑油	原油	水	水银
表面张力/ $(\times 10^{-3} \text{N/m})$	22.3	27	36	30	72.8	465

表 1-4 一个标准大气压、不同温度下水和空气接触时的表面张力

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	60	80	100
表面张力/ $(\times 10^{-3} \text{N/m})$	75.6	74.2	72.8	71.2	69.6	66.2	62.6	58.9

