



普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

齐清兰 霍倩 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

齐清兰 霍倩 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据高等院校土建类各相关专业 50 学时流体力学课程教学基本要求而编写的。全书共分十章，系统地阐述了流体静力学和流体动力学基础理论，流动阻力及能量损失，孔口、管嘴出流和有压管路，明渠均匀流和明渠非均匀流，堰流及闸孔出流，渗流，流体力学中非线性方程的求根问题等内容。每章之前有导读，正文之后有思考题、计算题。

本书可作为高等院校土建类各相关专业的教材，也可作为水文地质与工程地质、水文与水资源等专业的参考教材和全国注册土木工程师考试的参考书，也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

流体力学 / 齐清兰，霍倩主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2012.8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0132-4

I. ①流… II. ①齐… ②霍… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①035

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第211205号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 流体力学
作 者	齐清兰 霍倩 主编
出 版·发 行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16印张 379千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书是根据高等院校土建类各相关专业 50 学时流体力学课程教学基本要求而编写的。本教材进一步体现少学时流体力学的教学特点，坚持基本理论必需、够用为度，突出重点、难点和讲究实用，并将 MATLAB 解决复杂流体力学问题的方法编入教材。

本书共分十章，主要内容包括流体静力学，流体动力学，流动阻力及能量损失，孔口、管嘴出流和有压管路，明渠均匀流，明渠非均匀流，堰流及闸孔出流，渗流，流体力学中非线性方程的求根问题。根据课程要求，书中附有针对性较强的例题、思考题及计算题。

本书由石家庄铁道大学齐清兰、霍倩主编，石家庄铁道大学李强和石家庄市水利技术推广中心刘淑英参加编写工作。具体分工：第一、三、四章由齐清兰编写，第六、七、十章由霍倩编写，第二、九章由李强编写，第五、八章由刘淑英编写，全书由齐清兰统稿。

本书带“*”的章节，教师和学生可根据具体情况决定取舍。由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2012 年 6 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 流体的连续介质模型	3
第三节 流体的主要物理性质	3
第四节 作用在流体上的力	9
思考题	10
计算题	10
第二章 流体静力学	11
第一节 流体静压强及其特性	11
第二节 重力作用下流体静压强的分布规律	14
第三节 测量压强的仪器	18
第四节 作用在平面上的静水总压力	22
第五节 作用在曲面上的静水总压力	27
思考题	31
计算题	33
第三章 流体动力学	36
第一节 描述流体运动的两种方法	36
第二节 欧拉法的几个基本概念	38
第三节 恒定一元流连续性方程	44
第四节 理想流体及实际流体恒定元流能量方程	46
第五节 实际流体恒定总流能量方程	50
第六节 总水头线和测压管水头线的绘制	57
第七节 恒定气流能量方程	58
第八节 恒定总流动量方程	61
思考题	67
计算题	68
第四章 流动阻力及能量损失	73
第一节 能量损失的物理概念及其分类	73

第二节	流体运动的两种形态	75
第三节	均匀流沿程损失与切应力的关系	79
第四节	圆管中的层流运动	81
第五节	紊流运动	83
第六节	圆管中的紊流	86
第七节	圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素	90
第八节	非圆管的沿程损失	96
第九节	局部损失	98
思考题		105
计算题		106
第五章	孔口、管嘴出流和有压管路	109
第一节	液体经薄壁孔口的恒定出流	109
第二节	液体经管嘴的恒定出流	112
第三节	短管计算	115
第四节	长管计算	124
第五节	管网计算基础	131
思考题		136
计算题		138
第六章	明渠均匀流	142
第一节	概述	142
第二节	明渠均匀流的计算公式	144
第三节	明渠水力最优断面和允许流速	145
第四节	明渠均匀流水力计算的基本问题	148
第五节	无压圆管均匀流的水力计算	153
第六节	复式断面渠道的水力计算	156
思考题		158
计算题		159
第七章	明渠非均匀流	161
第一节	概述	161
第二节	断面单位能量和临界水深	162
第三节	缓流、急流、临界流及其判别准则	165
第四节	水跃	167
第五节	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	172
第六节	棱柱形渠道恒定非均匀渐变流水面曲线的分析	174
第七节	明渠水面曲线的计算	181
思考题		188
计算题		189

第八章 堰流及闸孔出流	191
第一节 堰流的特点及其分类	191
第二节 堰流的基本公式	192
第三节 薄壁堰	194
第四节 实用堰	196
第五节 宽顶堰	197
第六节 小桥孔径的水力计算	200
第七节 闸孔出流	204
思考题	206
计算题	206
第九章 渗流	207
第一节 概述	207
第二节 渗流基本定律	208
第三节 地下水的均匀流和非均匀流	211
第四节 井和集水廊道	215
思考题	220
计算题	220
* 第十章 流体力学中非线性方程的求根问题	222
第一节 非线性方程数值计算方法	222
第二节 流体力学中的高次方程求解	227
第三节 fzero 函数求解广义非线性方程的根	234
部分计算题答案	242
附录	245
参考文献	249

第一章 绪 论

【本章导读】

流体力学是研究流体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门学科。本章首先概要介绍这门学科研究对象（液体和气体）的一般特征以及流体力学的发展历史，然后详细阐述液体和气体的若干物理性质，如黏滞性、压缩性等，在忽略某些特性的基础上，引出了流体力学的三大基本模型：连续介质模型、理想流体模型、不可压缩流体模型。本章最后一节讨论了作用在流体上的力。

本章学习要求：理解和掌握流体质点、连续介质模型、黏滞性与理想流体模型、压缩性和膨胀性、表面力与质量力等基本概念。掌握流体区别于固体的重要特性。掌握牛顿内摩擦定律及其应用。

第一节 概 述

一、流体力学的任务及研究对象

流体力学是用实验和理论分析的方法来研究流体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门学科。流体力学按其研究内容侧重面不同，分为理论流体力学和应用流体力学。前者侧重研究理论体系，注重数学推导，后者侧重于解决工程实际问题。本教材以应用为主，属后者范畴。

在地球上，物质存在的主要形式是固体、液体和气体。由于同体积内分子数目、分子间距、分子内聚力等物质内部微观属性存在差异，导致它们的宏观表象也不同：固体有一定的体积和一定的形状；液体有一定的体积而无一定的形状，但有自由表面；气体无一定的体积也无一定的形状。流体包括液体和气体，流体力学的研究对象为液体和气体。

从力学分析意义上看，流体和固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体有能力抵抗一定的拉力、压力和剪切力，相应的科学是材料力学、弹性力学等；而流体几乎不能承受拉力，处于静止状态下的流体还不能抵抗剪切力，即流体在很小剪切力的作用下将发生连续不断的变形，直到剪切力消失为止，流体的这种特性称为易流动性。流体可承受压力，但气体与液体压缩性不同，气体易于压缩，而液体难于压缩。液体与气体在运动状态下表现出相似的规律，易流动性是两种物质的共性，也是流体区别于固体的根本标志，因此在历史发展中，逐渐形成了流体力学这一门独立学科。

二、流体力学的发展历史

流体力学的萌芽，人们认为是从距今约 2000 多年前西西里岛上的希腊学者阿基米德（Archimedes，公元前 287—前 212 年）写的“论浮体”一文开始的。他对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结，而这些知识也早已在我国、印度、埃及等国家里，由劳动人民累积起来。

15 世纪中叶至 18 世纪下半叶,生产力有了很大的发展,遇到许多流体力学问题,但由于科学水平的限制,人们主要用实验的方法或直觉来解决。

1738 年,瑞士数学家伯诺里 (D. Bernoulli, 1700—1782 年) 出版了名著《流体动力学》,建立了表达流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系的伯诺里方程。1755 年,瑞士数学家欧拉 (L. Euler, 1707—1783 年) 提出了流体的连续介质模型以及流体运动的解析方法。这些成就为研究流体运动的规律奠定了理论基础,在此基础上形成一门属于数学的古典“流体力学”。

在古典“流体力学”的基础上纳维和斯托克斯提出了著名的实际黏性流体的基本运动方程,为流体力学的长远发展奠定了理论基础。但由于古典“流体力学”所用数学求解的复杂性和流体模型的局限,不能很好地解决工程问题,于是科学家与工程技术人员试图从实验角度来解决流体力学问题,故形成了以实验方法来总结经验公式的“实验流体力学”。通过实验研究的途径人们制定了一些经验公式,以满足工程的需要。其中有些经验公式缺乏理论基础,使应用范围狭窄且缺乏进一步发展的基础,但却为后人留下不少宝贵的遗产。

从 19 世纪起,纯理论研究或单独用实验方法研究流体运动规律已不能适应高速发展的生产需要,从而走向了理论分析与实验研究相结合的道路。两者的紧密配合进一步推动了流体力学的发展,形成了现代流体力学。如 1876 年英国物理学家雷诺 (O. Reynolds, 1842—1912 年) 在系统实验的基础上,揭示了流体运动时的两种形态——层流和紊流,于次年他又提出了紊流运动的基本方程式——雷诺方程;1933 年尼古拉兹 (J. Nikuradze, 1894—1979 年) 通过对人工粗糙管的系统实验得出了水流阻力与水头损失的关系。又如,法国工程师达西 (H. Darcy, 1803—1858 年)、爱尔兰工程师曼宁 (Robert Manning, 1816—1897 年)、英国工程师弗汝德 (W. Froude, 1810—1879 年) 及德国工程师普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953 年) 等都进行了大量的实验研究和理论分析,从而形成了理论和实践相结合的研究道路,促进了流体力学的新发展。

我国是文明古国,水利事业的历史悠久,人们在长期实践中逐步加深了对流体运动规律的认识。如:4000 多年前的大禹治水,就已经认识到治水应顺水之性,须引导和疏通。秦朝在公元前 256—前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠,隋朝 (587—610 年) 完成的南北大运河,说明当时对明渠水流和堰流的认识已达到相当高的水平。距今 1000 多年前的计时工具“铜壶滴漏”,就是根据孔口出流原理使盛水容器水位发生变化来计算时间,表明当时对孔口出流的规律已有相当的认识。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

在 20 世纪 60 年代以后,由于计算机的发展与普及,流体力学的应用更是日益广泛。在建筑工程中的应用,如地基降水、路基排水、地下水渗流、水下与地下建筑物的受力分析、围堰修建等;在市政工程中的应用,如桥涵孔径的设计、给水排水、管网计算、泵站和水塔的设计、隧道通风等;在城市防洪工程中的应用,如河道的过流能力,堤、坝的作用力与渗流问题,防洪闸坝的过流能力问题等;在建筑环境与设备工程中的应用,如供热、通风与泵站设计等;在安全工程中的应用,如室内自喷消防系统设计等。

三、本课程的基本要求

(1) 具有较为完整的理论基础,包括:

1) 掌握流体力学的基本概念;

- 2) 掌握流体的总流分析方法;
- 3) 掌握流体运动能量转化和水头损失的规律。
- (2) 具有对一般流动问题的分析和计算能力, 包括:
 - 1) 水力荷载的计算;
 - 2) 管道、渠道和堰过流能力的计算, 井的渗流计算;
 - 3) 水头损失的分析和计算。
- (3) 掌握测量水位、压强、流速、流量的常规方法。
- (4) 重点掌握基本概念、基本方程、基本应用, 即流体力学的基础知识。

第二节 流体的连续介质模型

从分子结构的观点来看, 物质都是由分子组成的, 组成物质的分子是不连续的, 彼此间有空隙。由于分子间有空隙存在, 故严格地说, 流体是不连续的。但是, 流体力学的任务并不是研究个别分子的微观运动, 而是研究大量分子“集体”所显示的特性, 也就是所谓的宏观特性或宏观量。因此, 可以设想把所讨论的流体无限制地分割成为无限小的流体微元, 相当于微小的分子集团, 它的尺度大小同一切流动空间相比微不足道, 却含有大量分子, 并具有一定的质量, 叫做流体的“质点”(或微团)。从而认为, 流体就是由这样的一个个紧挨着一个的连续的质点所组成、其中再也没有任何空隙的连续体, 即所谓“连续介质”。同时又认为流体的物理、力学特性, 如密度、速度、压力和能量等, 也从而具有随同位置而连续变化的性质。这样就排除了分子运动的复杂性, 而把物理量视为时空连续函数, 可应用数学分析中的连续函数理论来分析流体的运动, 应用方便。连续介质假定对大多数流体都是适用的, 但对于很稀薄的气体, 应视为不连续体, 而不能应用连续介质模型。

第三节 流体的主要物理性质

流体具有惯性、黏滞性、压缩性、膨胀性和表面张力特性等重要物理性质, 流体的黏性是本节介绍的重点。

一、惯性

一切物质都具有惯性, 惯性是物质保持原有运动状态的特性。质量是物体惯性大小的量度, 质量越大, 惯性也越大。单位体积流体所具有的质量称为密度

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

其量纲为 $[M/L^3]$, 国际单位是 kg/m^3 。

对于非均质流体, 密度随点而异。若取包含某点在内的体积 ΔV , 其中质量为 Δm , 则该点密度需用极限方式表示

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

重度 γ 是单位体积流体所具有的重量, 与密度的关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-2)$$

其量纲为 $[M/L^2 T^2]$ ，国际单位是 N/m^3 。在工程计算中一般采用 $g=9.8m/s^2$ 。

气体的密度随压强和温度而变化，一个标准大气压（101.325kPa）下 $0^\circ C$ 空气的密度为 $1.29kg/m^3$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下，其密度和重度随温度的变化见表 1-1。几种常见流体的重度见表 1-2。

表 1-1 水的密度和重度

温度 ($^\circ C$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)	温度 ($^\circ C$)	重度 (kN/m^3)	密度 (kg/m^3)
0	9.806	999.9	40	9.731	992.2
5	9.807	1000.0	50	9.690	988.1
10	9.805	999.7	60	9.645	983.2
15	9.799	999.1	70	9.590	977.8
20	9.790	998.2	80	9.529	971.8
25	9.778	997.1	90	9.467	965.3
30	9.755	995.7	100	9.399	958.4

表 1-2 几种常见流体的重度

流体名称	水 银	汽 油	酒 精	四氯化碳	海 水
重度 (N/m^3)	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
温度 ($^\circ C$)	0	15	15	20	15

在工程计算中，通常将液体的密度和重度看作常量，如采用水的密度 $\rho=1000kg/m^3$ （重度 $\gamma=9800N/m^3$ ）。

二、黏滞性和理想流体模型

与固体不同，流体具有易流动性，静止时不能承受任何微小的切应力及抵抗剪切变形。当流体处在运动状态时，流体质点之间存在着相对运动，则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动，这种性质称为流体的黏滞性，此内摩擦力又称为黏滞力。黏滞性是流体的基本特性之一，只有在相对运动时才显示出来，静止流体是不显示黏滞性的。

以沿固体平面壁作直线流动的液体为例说明流体的黏滞性。如图 1-3-1 所示，当液体沿着一个固体平面壁作平行的直线流动时，液体质点是有规则的一层一层向前运动而不互相混掺（这种各流层间互不干扰的运动称为“层流运动”，以后将详细讨论这种运动的特性）。由于液体具有黏滞性的缘故，靠近壁面附近流速较小，远离壁面处流速较大，因而各个不同液层的流速大小是不相同的。若距固体边界为 y 处的流速为 u ，在相邻的 $y+dy$ 处的流速为 $u+du$ ，由于两相邻液层间存在着相对运动，在两流层之间将成对地产生内摩擦力。下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力，而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的摩擦力，这两个力大小相等，方向相反，都具有抵抗其相对运动的性质。

根据前人的科学实验证明，内摩擦力 F 与流体的性质有关，并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 及接触面积 ω 成正比，而与接触面上的正压力无关，即

$$F \propto \omega \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

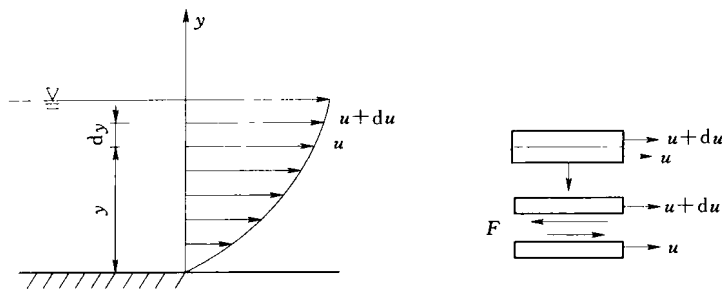


图 1-3-1 黏性流体的相对运动

引入比例系数 μ ，并以 τ 表示单位面积上的摩擦力（即黏滞切应力），则得

$$\tau = \frac{F}{\omega} = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-4}$$

式（1-4）就是著名的“牛顿内摩擦定律”，它可表述为：作层流运动的流体，相邻流层间单位面积上所作用的内摩擦力（或黏滞力），与流速梯度成正比，同时与流体的性质有关。式中的 μ 是与流体的物理性质有关的比例系数，称为动力黏滞系数（或动力黏性系数）。黏性大的流体 μ 值大，黏性小的流体 μ 值小。 μ 的国际单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

流体的黏性还可以用 ν 来表示， ν 称为运动黏滞系数，与动力黏滞系数的关系为

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

其国际单位是 m^2/s 。

流体的黏滞系数主要随温度变化。水的运动黏滞系数 ν 随温度变化的经验公式为

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{1-5}$$

其中 t 为水温，以 $^{\circ}\text{C}$ 计， ν 以 cm^2/s 计，为了使用方便，在表 1-3 中列出不同温度时水的 ν 值。

表 1-3 不同水温时的 ν 值

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
ν (cm^2/s)	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239	0.01176	0.01118	0.01062	0.01010
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	22	24	26	28	30	35	40	45	50	55	60
ν (cm^2/s)	0.00989	0.00919	0.00877	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00515	0.00478

在表 1-4 中，列举了一个大气压下（ $98.07\text{kN}/\text{m}^2$ ）不同温度时空气的黏滞系数。

表 1-4 一个大气压下空气的黏滞系数

$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t(^{\circ}\text{C})$	$\mu(10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

由表 1-3 及表 1-4 可看出,水和空气的黏滞系数随温度变化的规律是不同的,这是因为流体黏滞性是由流动流体的内聚力和分子动量交换所引起的。随温度升高,液体的黏滞性减小,而气体黏滞性增大。这是由于液体分子间距较小,相互吸引力即内聚力较大,内聚力是影响黏滞性的主要原因。随着温度升高,分子间距增大,内聚力减小,黏滞性降低。气体分子间距大,内聚力很小,其黏滞性主要与分子间动量交换有关,随着温度升高,分子间动量交换加剧,切应力随之增加,黏滞性增大。一般在相同条件下,液体的黏滞系数要大于气体的黏滞系数。

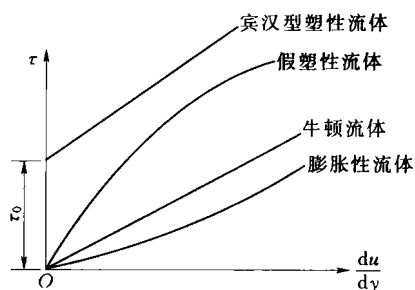


图 1-3-2 牛顿流体和非牛顿流体图示

必须指出,牛顿内摩擦定律只适用于一般流体,对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等。不符合的叫做非牛顿流体,如接近凝固的石油、泥浆等。它们的差别可用图 1-3-2 表示。本书只讨论牛顿流体。

当考虑流体的黏性后,将使流体运动的分析变得很复杂。在流体力学中,为了简化分析,可以对流体的黏性暂不考虑,而引出没有黏性的理想流体模型。

在理想流体模型中,黏滞系数 $\mu=0$ 。由理想流体模型分析所得的结论应用到实际流体中时,必须对没有考虑黏性而引起的偏差进行修正。

三、压缩性和膨胀性

流体受压后体积减小,同时其内部将产生一种企图恢复原状的内力(弹性力)与所受压力维持平衡,撤除压力后,流体可立即恢复原状,这种性质称为流体的压缩性或弹性。若流体受热,则体积膨胀,密度减小,这种性质称为流体的膨胀性。

1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来量度。设压缩前的体积为 V ,密度为 ρ ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,密度增加 $d\rho$,其体积压缩系数为

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

由于当 dp 为正时, dV 必为负值,故式 (1-6) 右端加一负号,保持 β 为正数。 β 的单位为 m^2/N 。

体积压缩系数又可表示为

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

体积弹性系数 K 是体积压缩系数的倒数,即

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

K 的单位为 N/m^2 。

表 1-5 列举了水在温度 0°C 时,不同压强下的压缩系数。

表 1-5

水的压缩系数 (0℃)

压强 (at)	5	10	20	40	80
β (m ² /N)	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

液体的膨胀性, 用体胀系数 α_v 表示, 与压缩系数相反, 当温度增加 dT 时, 液体的密度减小率为 $-d\rho/\rho$, 体积变化率为 dV/V , 则体胀系数 α_v 为

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

或

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

由表 1-1 可看出, 在温度较低时 (10~20℃), 温度每增加 1℃, 水的密度减小约为 15/10000; 在温度较高时 (90~100℃), 温度每增加 1℃, 水的密度减小约为 7/10000。由表 1-5 可看出: 若 dp 为一个大气压, dV/V 约为 1/20000。这说明水的压缩性和膨胀性很小, 一般情况下可以忽略不计。只有在某些特殊情况下, 才考虑水的压缩性和膨胀性。如输水管路中的水击现象, 热水采暖问题等。

2. 气体的压缩性和膨胀性

气体的密度由理想气体状态方程确定。在温度不过低, 压强不过高时, 气体密度、压强和温度之间的关系服从理想气体状态方程为

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

式中: p 为气体的绝对压强, Pa; T 为气体的热力学温度, K; ρ 为气体的密度, kg/m³; R 为气体常数, N·m/(kg·K), 空气的 R 值是 287。

在温度不变的等温情况下, 对于同种气体, RT =常数, 因此气态方程简化为 p/ρ =常数。原状态的压强 p 和密度 ρ 与另一种状态下的压强 p_1 和密度 ρ_1 的关系为

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明在等温情况下压强和密度成正比。一般来说, 随着压强增大, 气体体积缩小, 密度增大; 但是气体有一个极限密度, 对应的压强称极限压强。当压强超过极限压强时, 密度便不再增大, 所以式 (1-12) 适用于远小于极限压强的情况。

在压强不变的定压情况下, 对于某种气体, p/R =常数, 因此由状态方程得 ρT =常数。初始温度 T_0 下的密度 ρ_0 与其他状态下的温度和密度的关系为

$$\rho_0 T_0 = \rho T \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表明在定压条件下, 温度与密度成反比。这一规律对各种不同温度下的一切气体均适用。特别是在中等压强范围内, 对于空气及其他不易液化的气体相当准确。只有当温度降到气体液化的程度, 才有较明显误差。

表 1-6 列出了在标准大气压 (760mmHg) 下, 不同温度时的空气容重及密度。

表 1-6

在标准大气压时的空气重度及密度

温度 (℃)	重度 (N/m ³)	密度 (kg/m ³)	温度 (℃)	重度 (N/m ³)	密度 (kg/m ³)	温度 (℃)	重度 (N/m ³)	密度 (kg/m ³)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185	60	10.40	1.060
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165	70	10.10	1.029
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146	80	9.81	1.000
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128	90	9.55	0.973
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093	100	9.30	0.947

气体虽然具有压缩性和膨胀性，但是针对具体问题，通过分析压缩性是否起显著作用后，可决定在计算时是否可忽略。当气体运动速度较低（远小于音速），在流动过程中压强和温度变化不大，密度仍可看做常数，这种气体称为不可压缩气体。反之，对于气体速度较高（接近或超过音速）的情况，在流动过程中密度变化很大，密度已不能视为常数的气体称为可压缩气体。在土木工程中所遇到的大多数气体流动，速度远小于音速，其密度变化不大，比如烟道内气体的流动，可当做不可压缩流体看待。所以空气和水一样在多数工程计算中均看作不可压缩流体。

四、表面张力及表面张力系数

液体表面层由于分子引力不平衡而产生的沿表面作用于任一界限上的张力，称为表面张力。它可使水滴成半球状悬在水龙头出口而不下滴。当细管子插入液体中时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，形成所谓的毛细现象。如图 1-3-3 所示，对于 20℃ 的水，玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为

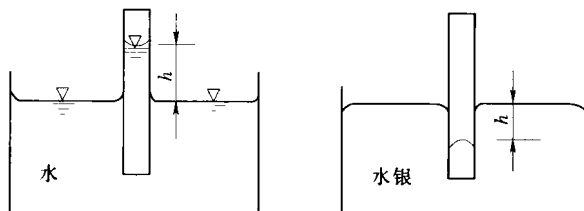


图 1-3-3 水和水银的毛细现象

面张力。它可使水滴成半球状悬在水龙头出口而不下滴。当细管子插入液体中时，表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度，形成所谓的毛细现象。如图 1-3-3 所示，对于 20℃ 的水，玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为

$$h = \frac{29.8}{d} (\text{mm}) \quad [1-14 (a)]$$

对水银，玻璃管中汞面低于容器汞面的高度 h 约为

$$h = \frac{10.15}{d} (\text{mm}) \quad [1-14 (b)]$$

上面两式中的 d 为玻璃管的内径，以 mm 计。由此可见，管的内径越小， h 的数值越大，因此，通常要求测压管的直径不小于 1cm。

表面张力仅在液体与其他介质（如气体或固体）分界面附近的液体表面产生，液体内部并不存在，所以它是一种局部受力现象。表面张力的大小用表面张力系数 σ 表示，其单位为 N/m。 σ 的大小随液体种类和温度变化而异。对于 20℃ 的水， $\sigma = 0.074 \text{ N/m}$ ，对于水银 $\sigma = 0.54 \text{ N/m}$ 。由于表面张力很小，一般说来对液体的宏观运动不起作用，可以忽略不计，只有在某些特殊情况下，如水滴及气泡形成、液体射流的裂散及水力小模型试验等问题中才显示其影响。

五、汽化压强

液体分子逸出液面向空间扩散的过程称为汽化，液体汽化为蒸汽。汽化的逆过程称为凝

结，蒸汽凝结为液体。在液体中，汽化和凝结同时存在，当这两个过程达到动平衡时，宏观的汽化现象停止，此时液体的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，水的汽化压强见表 1-7。

表 1-7 水的汽化压强

水温 (℃)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
汽化压强 (kN/m ²)	0.61	0.87	1.23	1.70	2.34	3.17	4.24	7.38	12.33	19.92	31.16	47.34	70.10	101.33

当水流某处的压强低于汽化压强时，水汽就要游离出来，对水流和相邻固体壁将发生不良影响，会产生气蚀现象，在工程上是要时常注意的。

综上所述，从工程应用的角度看来，在一般情况下，所研究的流体是一种易于流动的、具有黏性的、不可压缩的连续介质。只有在特殊情况下才考虑压缩性、表面张力及汽化压强等特性。

第四节 作用在流体上的力

处于平衡或运动状态的流体，都受有各种力的作用，如重力、惯性力、摩擦力和表面张力等。如果按其作用的特点，这些力可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

表面力是指作用在所研究的流体体积表面上的力。表面力的大小与受力面积成正比，故又称面积力。因流体几乎不能承受拉力，故流体表面力的分力只有垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力，习惯上以压应力（压强）和切应力表示。若在运动流体中取隔离体为研究对象（图 1-4-1），在其表面 A 点取一微元面积 $\Delta\omega$ ，作用于 A 点的压应力和切应力分别为

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}$$
$$\tau = \lim_{\Delta\omega} \frac{\Delta T}{\Delta\omega}$$

压应力（压强）和切应力的单位均为 Pa（N/m²）。

二、质量力

作用于所研究的流体体积内所有质点上的力称为质量力。质量力的大小与质量成正比。在均质流体中，质量力又与流体体积成正比，故又称体积力。单位质量流体所受到的质量力称为单位质量力。

设所研究的流体质量为 M ，作用于其上的质量力为 F ，则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{M} \tag{1-15}$$

若质量力 F 在直角坐标轴上的投影为 F_x 、 F_y 、 F_z 。单位质量力的分量分别用 X 、 Y 、 Z 表示，则

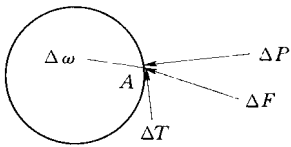


图 1-4-1 法向力与切向力

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{M} \\ Y &= \frac{F_y}{M} \\ Z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

单位质量力具有加速度的量纲，因此它的单位为 m/s^2 。最常见的质量力有重力和惯性力。

思 考 题

- 1-1 为什么要引出连续介质的概念？它对研究流体规律的意义何在？
- 1-2 什么叫流体的黏滞性？在什么条件下才能显示黏滞性？
- 1-3 理想流体和实际流体有何区别？为什么要引出理想流体的概念？
- 1-4 若作用在流体上的质量力只有重力，且选择 z 坐标轴的方向垂直向上，此时单位质量力 X 、 Y 、 Z 各为多少？

计 算 题

- 1-1 某种汽油的重度为 7.00kN/m^3 ，问其密度为多少？
- 1-2 20°C 的水，其体积为 2.5m^3 ，当温度升至 80°C ，求体积增加多少？
- 1-3 使 10°C 的水的体积减小 0.1% 及 1.0% 时，应增大压强各为多少？
- 1-4 水的体积为 5m^3 ，当温度不变时，压强从 1 个大气压增加到 5 个大气压，其体积缩小了 0.001m^3 ，试求水的弹性系数 K 。
- 1-5 已知一明渠，流速分布函数为 $u = -625y^2 + 50y$ ，运动黏性系数 $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，求 $y=0, 2\text{cm}$ 处的黏滞切应力。