

高等学校教材

流体力学

李玉柱 苑明顺 编



高等教育出版社

L33
L340

高等学校教材

流体力学

李玉柱 苑明顺编

高等教育出版社

411263

(京) 112 号

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/李玉柱, 苑明顺编. —北京: 高等教育出版社, 1998

高等学校教材

ISBN 7-04-006445-6

I. 流… II. ①李… ②苑… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 02834 号

*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码: 100009 传真: 64014048 电话: 64054588

新华书店总店北京发行所发行

化学工业出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 11.25 字数 290 000

1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月第 1 次印刷

印数 0 001—5 085

定价 11.00 元

凡购买高等教育出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等
质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换

版权所有, 不得翻印

D298/25
内 容 简 介

本书是为高等学校结构工程等专业流体力学课程编写的教材（适用于50学时）。教材内容覆盖了全国注册结构工程师流体力学考试大纲的全部内容。本书共分十章：绪论，流体静力学，流体运动学，流体动力学基础，层流、紊流及其能量损失，孔口、管嘴出流与有压管流，明渠均匀流，渗流，量纲分析和相似原理，流动要素量测。

本书注意加强理论基础和能力的培养，力求思路清晰，物理概念明确，理论联系实际。本书可作为结构工程等专业本科生教材，更是全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书。

前 言

本书是为高等学校结构工程专业流体力学课程编写的教材(适用于50学时)。教材内容覆盖了全国注册结构工程师流体力学考试大纲的全部内容。

本书根据结构工程专业的需要,介绍了工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法,注意加强理论基础和能力的培养,力求思路清晰,物理概念明确,理论联系实际。

在编写过程中,考虑到各院校的学时数不同,要求不完全一样,任课教师在具体教学中可以根据各院校的不同情况,对某些章节有所取舍。根据全国注册结构工程师考试大纲的要求,专门设置了第十章,介绍流动要素的量测,不仅介绍了根据流体力学原理设计的一些传统的量测方法,而且还介绍了近代一些先进的量测技术,开阔了眼界,拓宽了思路。

本书由清华大学李玉柱、苑明顺共同编写。全书内容经编者共同讨论,分工执笔:李玉柱编写第一、七、八、九章,苑明顺编写第二、三、四、五、六、十章,全书由李玉柱统稿审定。

本书由哈尔滨建筑大学刘鹤年教授审阅,提出了许多宝贵意见。在本书的编写过程中,还得到了国家教委高等学校水力学及流体力学课程教学指导小组一些专家教授的热情鼓励和支持,在此一并致谢。

由于时间紧张,加之编者水平所限,不妥之处恳请读者批评指正。

编者于清华园

1997年12月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 流体力学的任务及其发展简史	1
§ 1-2 流体的主要物理力学性质	4
§ 1-3 作用在流体上的力	14
§ 1-4 流体的力学模型	16
习题	17
第二章 流体静力学	20
§ 2-1 流体静压强特性	20
§ 2-2 流体平衡微分方程	23
§ 2-3 重力场中静水压强的分布	28
§ 2-4 平面上的总压力计算	33
§ 2-5 曲线上的总压力计算	41
习题	47
第三章 流体运动学	52
§ 3-1 流体运动的描述方法	52
§ 3-2 流场的基本概念	58
§ 3-3 流体运动的质量守恒方程	65
§ 3-4 流体微团的运动	71
习题	76
第四章 流体动力学基础	79
§ 4-1 理想流体运动方程	80
§ 4-2 实际流体的能量方程	87
§ 4-3 实际流体恒定总流的动量方程	97
§ 4-4 理想流体的无旋流动	103
习题	116
第五章 层流、紊流及其能量损失	125

§ 5-1	层流与紊流的概念	127
§ 5-2	均匀流的沿程损失	132
§ 5-3	圆管中的层流流动	136
§ 5-4	紊流流动的特征	139
§ 5-5	紊流的沿程损失	145
§ 5-6	紊流的断面流速分布	157
§ 5-7	流动的局部损失	164
§ 5-8	边界层的基本概念与物体的绕流阻力	172
	习题	180
第六章	孔口、管嘴出流与有压管流	185
§ 6-1	薄壁孔口出流	185
§ 6-2	管嘴出流	192
§ 6-3	有压管道恒定流计算	199
§ 6-4	管网流动计算基础	212
§ 6-5	有压管道中的水击	221
	习题	230
第七章	明渠均匀流	237
§ 7-1	概述	237
§ 7-2	明渠均匀流的水力特征和基本公式	241
§ 7-3	梯形断面明渠均匀流的水力计算	244
§ 7-4	无压圆管均匀流的水力计算	253
§ 7-5	复式断面明渠均匀流的水力计算	257
	习题	260
第八章	渗流	263
§ 8-1	渗流的基本概念	263
§ 8-2	渗流基本定律	266
§ 8-3	单井的渗流计算	273
§ 8-4	集水廊道的渗流计算	279
§ 8-5	大口井的渗流计算	281
§ 8-6	井群的渗流计算	283
	习题	287

第九章 量纲分析和相似原理	290
§ 9-1 量纲和谐原理	290
§ 9-2 量纲分析法	295
§ 9-3 流动相似原理	302
§ 9-4 模型试验	310
习题	316
第十章 流动要素量测	320
§ 10-1 压强与液位的量测	320
§ 10-2 流速量测	328
§ 10-3 流量量测	335
§ 10-4 流动显示与全流场测速法	343
习题	344
主要参考文献	349

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学的任务及其发展简史

流体力学是研究流体的平衡和流体的机械运动规律及其在工程实际中应用的一门学科。流体力学研究的对象是流体，包括液体和气体。

流体最基本的特征是它具有流动性，也就是说流体在一个微小的剪切力作用下，就能够连续不断地发生变形，即发生流动，只有在外力停止作用后，变形才能停止，这正是流体不同于固体最基本的特征。固体则不同，固体能维持它固有的形状，它可以承受一定的拉力、压力和剪切力。液体由于具有流动性，因此没有一定的形状，它随容器的形状而变。液体具有自由表面，不能承受拉力，静止时不能承受剪切力。气体不能承受拉力，静止时不能承受剪切力，具有明显的压缩性，因此也不具有一定的体积，可以充满整个容器。

流体作为物质的一种基本形态，必须遵循自然界一切物质运动的普遍规律，如牛顿的力学定律、质量守恒定律和能量守恒定律等有关物体宏观机械运动的一般规律。所以，流体力学中的基本定理实质上都是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用。

流体力学在许多工业部门中都有着广泛的应用。航空工业中飞机的制造离不开空气动力学；造船工业部门要用到水动力学。空气动力学、水动力学都是流体力学的一个分支。电力工业中，无论是水电站、火电站，还是核电站、地热电站，工作介质都是流

体。机械工业中的润滑、冷却、液压传动都要用到流体力学基本原理。冶金工业中，炉内气体的流动、冷却、通风等有着许多流体力学问题。水利工程中的水资源运用、泄洪消能、河道整治、灌溉排水等有着大量水力学问题。此外，化工流程、石油输送、环境保护、交通运输等等也都遇到不少流体力学问题。所以，可以说流体力学在几乎所有的工业部门中都有着广泛的应用。

流体力学和土建类各专业有着更加密切的关系。在土建工程中，城市的生活和工业用水，从开拓水渠、取水口布置、水的净化与消毒、水泵选择、水塔修建、管路布置等需要解决一系列水力学问题。在公路与桥梁工程中，路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水，桥梁、涵洞、倒虹吸管和透水路堤的修建都与水密切相关。采暖通风工程中，热风采暖、冷风降温、燃气输送都以流体为工作介质。此外土建工程施工中，修建围堰、基坑排水、污水排放都要用到水力学的基本原理。因此，必须掌握好流体的各种力学性质和运动规律，才能有效地、正确地解决工程实际中所遇到的各种流体力学问题。

流体力学是在人类同自然界作斗争、在长期的生产实践中，通过科学实验逐步发展起来的。早在几千年以前，随着农业、航运事业的发展，人们逐渐认识了一些水流运动规律。我国古代劳动人民早在春秋战国和秦朝时期就已修建了都江堰、郑国渠和灵渠。以后则有汉渠和唐徕渠，大大发展了灌溉事业。特别是都江堰工程所总结的“深淘滩，低作堰”，反映了当时人们对明渠水流和堰流已有了一定的认识。公元前 485 年开始修建，隋朝最后完成的从杭州到北京的大运河长达 1 782km，大大改善了我国南北运输的条件，特别是在运河上大量地使用船闸，表明我国劳动人民的高度智慧。公元 1363 年制作的我国古代计时工具——铜壶滴漏就是利用孔口出流，水位随时间变化的规律制成的，反映当时人们对孔口出流已有相当认识。与我国情况相类似，早在几千年前，在埃及、巴比伦、希腊和印度等地，为了发展农业和航运事业，也

修建了大量的渠系。古罗马人则修建了大规模的供水管道系统。这些事例说明人们在大量的生产实践中也认识了一些水流运动的规律。但是，真正对流体力学学科形成最早作出贡献的是古希腊的阿基米德 (Archimedes)，他在公元前 3 世纪撰写了“论浮体”，奠定了流体静力学的基础。此后千余年间，流体力学没有重大发展。

公元 15 世纪至 17 世纪，达·芬奇、伽利略、E·托里拆利、B·帕斯卡、I·牛顿等人用实验方法研究了水静压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水的切应力等问题。公元 18 世纪以后，流体力学得到了较快的发展，流体运动规律的研究大致可分为两大类：一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导，建立流体运动的基本方程，包括伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等等。但是由于这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符，或由于数学上难于求解，所以无法用于解决实际工程中一些复杂问题。与此同时，另一类的研究是为了解决生产实际问题，从大量的实验和实际观测中总结出来一些经验关系式，并根据简化后的一维方程进行数学分析，建立各运动要素间的定量关系。从事这类研究并做出贡献的主要有：H·毕托、G·B·文丘里、A·de 谢才、R·曼宁等人。使上述两类研究得到统一的是由德国人 L·普朗特在 1904 年创立的边界层理论。这一理论既明确了理想流体的适用范围，又能计算实际物体运动时的摩阻力。

20 世纪以来，随着生产和科学技术的发展，特别是航空技术的迅速发展，使得理论分析和实验方法日益结合，形成了现代流体力学。根据侧重不同，又可将侧重于理论分析的流体力学称为理论流体力学，将侧重于应用研究的流体力学称为工程流体力学。

§ 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相对平衡还是作机械运动是由流体本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个方面。

1.2.1 惯性

惯性是物体保持其原有运动状态的一种性质。物体运动状态的任何改变，都必须克服惯性作用。表示惯性大小的物理量是质量。质量愈大，惯性愈大，运动状态愈难于改变。一个物体反抗改变原有运动状态而作用于其他物体上的反作用力称为惯性力。设物体质量为 m ，加速度为 a ，则惯性力 F 的数值为

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

负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

流体单位体积内所具有的质量称为密度，以 ρ 表示。对于均质流体，若其体积为 V ，质量为 m ，则

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

对于非均质流体，各点的密度不同。要确定空间某点流体的密度，可在该点周围取一微元体积 ΔV ，若它的质量为 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，密度的单位为 kg/m^3 。

流体的密度随温度和压强的变化而变化。在一个标准大气压下，不同温度下水和空气的密度值见表 1-1。实验表明，液体的密

度随温度和压强的变化甚微，在绝大多数实际工程流体力学问题中，可近似认为液体的密度为一常数。计算时，一般采用水的密度值为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 。

表 1-1 在标准大气压时不同温度下水和空气的密度 / (kg/m^3)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	水	空气	温度/ $^{\circ}\text{C}$	水	空气
0	999.9	1.293	40	992.2	1.128
5	1 000.0	1.270	50	988.1	1.093
10	999.7	1.248	60	983.2	1.060
15	999.1	1.226	70	977.8	1.029
20	998.2	1.205	80	971.8	1.000
25	997.1	1.185	90	965.3	0.973
30	995.7	1.165	100	958.4	0.947

1.2.2 万有引力特性

物体之间具有相互吸引的性质,这个吸引力称为万有引力。在流体运动中，一般只需考虑地球对流体的引力，这个引力就是重力，用重量 G 表示。设物体的质量为 m ，重力加速度为 g ，则重量

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

1.2.3 粘性

由于流体具有流动性，在静止时不能承受剪切力以抵抗剪切变形，但在运动状态下，流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力以抵抗剪切变形，这种性质叫做粘性。内摩擦力又称为粘滞力。流体的粘性是流体中发生机械能损失的根源，是流体的一个非常重要的性质。

由牛顿在 1686 年首先提出的,并经后人加以验证的流体内摩擦定律可表述为：处于相对运动的两层相邻流体之间的内摩擦力

(或切力) T ，其大小与流体的物理性质有关，并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 和流层的接触面积 A 成正比，而与接触面上的压力无关。其数学表达式为：

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式中 μ 为比例系数，在 A 和 $\frac{du}{dy}$ 相同的条件下粘性越大的流体，其内摩擦力越大，因而 μ 也越大，故可以用 μ 来量度流体的粘性。 μ 称为动力粘度，可简称粘度。在国际单位制中， μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力即切应力，则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

切应力 τ 的单位为 Pa 。

式 (1-6) 中 $\frac{du}{dy}$ 表示速度沿垂直于速度方向的变化率。为了更好地理解速度梯度的意义，在图 1-1a 中垂直于流动方向的 y 轴上任取一边长为 dy 的方形流体质点 $acdb$ ，并将它放大成图 1-1b。由于其下表面的速度 u 小于上表面的速度 $u + du$ ，经过 dt 时段以后，下表面移动的距离 $u dt$ 小于上表面移动的距离 $(u + du) dt$ ，因而方形质点 $acdb$ 变形为 $a' c' d' b'$ ，两流层间的垂直连线 ac 和 bd 在 dt 时段里变化了角度 $d\theta$ ，由于 dt 是一个微小时段，因此转角 $d\theta$ 也很小，所以

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

故
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

可见，速度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。所以，牛顿内摩擦定律也可以理解为切应力与剪切变形速度成正比。

在分析粘性流体的运动规律时，经常同时出现 μ 和 ρ 的比值，流体力学中习惯于把它们组合成一个量，用 ν 来表示，称为运动粘

度，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

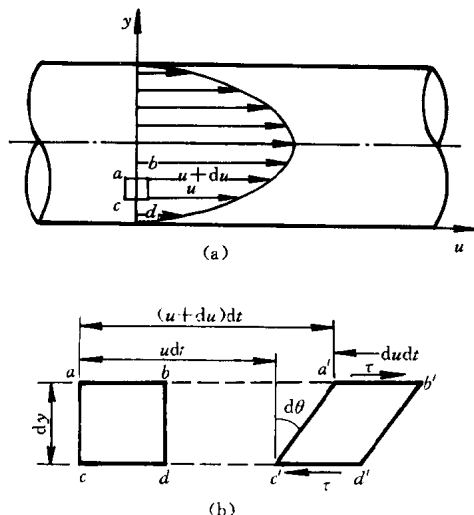


图 1-1 流体质点的直角变形速度

在国际单位制中 ν 的单位是 m^2/s 。

流体的粘性一般是随温度和压强而变化的，但实验表明，在低压情况下（通常指低于 100 个大气压），压强的变化对流体的粘性影响很小，一般可以忽略。温度则是影响流体粘性的主要因素，而且液体和气体的粘度随温度的变化规律是不同的，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加大。这可以从分子的微观运动来说明：粘性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果，温度升高，分子间的吸引力降低，分子间热运动增强，动量增大；反之，温度降低，分子间吸引力增大，分子间热运动减弱，动量减小。对于液体来说，分子间的吸引力是决定性的因素，所以，液体的粘性随温度的升高而减小；对于气体来说，分子间的热运动产生的动量交换是决定

因素，所以，气体的粘性随温度的升高而增大。在实际计算中，可查阅有关手册中各种流体的粘温曲线，或用经验公式计算粘度。限于篇幅，本书仅介绍水和空气的粘度。表 1-2 给出了常压下不同温度时水的粘度，表 1-3 给出了一个大气压下不同温度时空气的粘度。

表 1-2 水的粘度

t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1-3 一个大气压下空气的粘度

t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	0.017 2	13.7	90	0.021 6	22.9
10	0.017 8	14.7	100	0.021 8	23.6
20	0.018 3	15.7	120	0.022 8	25.2
30	0.018 7	16.6	140	0.023 6	28.5
40	0.019 2	17.6	160	0.024 2	30.6
50	0.019 6	18.6	180	0.025 1	33.2
60	0.020 1	19.6	200	0.025 9	35.8
70	0.020 4	20.5	250	0.028 0	42.8
80	0.021 0	21.7	300	0.029 8	49.9

最后还要指出牛顿内摩擦定律只适用于一般液体，而对某些特殊液体是不适用的。我们将满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、酒精和空气等，均为牛顿流体。而将不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体，如油漆、泥浆、浓淀粉糊等等。根据本书的任务，我们仅限于研究牛顿流体。对于非牛顿流体，可参阅有关的专门著作。

1.2.4 压缩性和膨胀性

流体的压缩性是指流体受压，体积缩小，密度加大，除去外力后能恢复原状的性质。

流体的膨胀性是指流体受热，体积膨胀，密度减小，温度下降后能恢复原状的性质。

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. 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。它表示单位压强所引起的体积相对减小值， α_p 愈大，液体愈易压缩。设液体的原有体积为 V ，如压强增加 $d p$ 后，体积减小 $d V$ ，则体积压缩系数为

$$\alpha_p = - \frac{d V / V}{d p} \quad (1-9)$$

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小，所以 $\frac{d V}{V}$ 和 $d p$ 异号，式中右侧加一负号，以保证 α_p 为正值。

由于液体随压强增大，体积缩小，但质量没有变化，即 $d m = 0$ ，故密度增大，由 $d m = d(\rho V) = \rho d V + V d \rho = 0$ 可得 $-\frac{d V}{V} = \frac{d \rho}{\rho}$ ，故体积压缩系数也可写成

$$\alpha_p = \frac{d \rho / \rho}{d p} \quad (1-10)$$