

061389

高等学校教材

工 程 流 体 力 学

陈卓如 金朝铭 王成敏 包 钢 编

陈卓如 主编

高等教育出版社

(京) 112 号

高等学校教材

工 程 流 体 力 学

陈卓如 金朝铭 王成敏 包 钢 编

陈卓如 主编

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.75 字数 470 000

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数 0001— 3 200

ISBN 7-04-003901-X/TB·202

定价 6.70 元

前 言

工程流体力学是动力类各专业及相近有关专业的一门重要技术基础课，它为该类专业主要专业课程的学习打下必要的理论基础。

本书按照高等工业学校工程流体力学课程教学基本要求编写，是动力类各专业的教材，课程时数为80学时左右。本书也可作为机械工程类、仪器类等有关专业的参考书。

工程流体力学内容十分广泛，即使同一课程基本要求也可以有不同的讲授体系。在本书编写中，除注重加强理论基础外，并注重联系工程实际。我们从推导普遍适用的纳维-斯托克斯方程等基本方程出发，讲述普遍运动方程在各种特殊限制条件下的求解应用，导出其它公式，力求系统地讲述流体运动的基本规律，使学生了解工程上处理流体力学问题的方法，并在推导过程中注意阐明其物理意义和应用条件。这样做既利于学生系统地学习基本理论，又利于培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。这样的讲授体系安排还避免了一些不必要的重复。

本书由陈卓如编写第四、五、六、七、八、十一、十三章和十三章习题及部分例题；金朝铭编写第一、三、九、十和十二章，其中第十章§8由包钢和王洪杰编写；王成敏编写第二章；包钢编写除十三章习题外的全部习题和大部分例题。全书由陈卓如主编。

山东工业大学孔珑教授审阅了全部书稿，对书稿提出了很多宝贵的修改意见，使书稿的质量得以提高。在本书编写过程中，哈尔滨工业大学流体力学教研室的同志们曾给予了热情的支持和帮

助,在此一并表示深切的谢忱。限于作者水平,书中难免存在错误和不足之处,愚望读者指正。

编 者

1991 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 流体力学研究的内容和方法	1
§ 1-2 流体力学发展简史	2
§ 1-3 单位制简介	6
§ 1-4 流体的连续介质模型	8
§ 1-5 作用在流体上的力	9
§ 1-6 流体的主要物理性质	11
§ 1-7 表面张力和毛细现象	26
习题	30
第二章 流体静力学	33
§ 2-1 流体静压强及其特性	33
§ 2-2 流体平衡微分方程式、力函数、等压面	36
§ 2-3 重力作用下流体平衡基本方程式	41
§ 2-4 流体中压强的表示方法、平衡基本方程式的物理意义	45
§ 2-5 流体静压强的传递、流体测压计原理	49
§ 2-6 重力和其它质量力同时作用下流体的平衡	53
§ 2-7 静止流体对平面壁的作用力	59
§ 2-8 静止流体对曲面壁的作用力、压力体	63
§ 2-9 浮力原理、潜体与浮体的平衡和稳定	67
习题	79
第三章 流体运动学	88
§ 3-1 研究流体运动的两种方法	88
§ 3-2 恒定流动和非恒定流动,一元、二元、三元流动	92
§ 3-3 迹线、流线、流束、过流断面和流量	94
§ 3-4 连续性方程	101

§ 3-5 流体微团的运动分析	107
§ 3-6 有旋运动和无旋运动	114
习题	116
第四章 理想流体动力学基础	120
§ 4-1 理想流体运动微分方程式	120
§ 4-2 运动微分方程式的葛罗米柯-兰姆(Gromeco-Lamb)形式	123
§ 4-3 恒定有旋运动中沿流线的伯努利(Bernoulli)积分	126
§ 4-4 恒定有势运动中的欧拉积分	128
§ 4-5 非恒定有势运动中的拉格朗日积分	129
§ 4-6 重力作用下的伯努利方程	131
§ 4-7 伯努利方程的意义	132
§ 4-8 相对运动中的伯努利方程	134
§ 4-9 非恒定有旋流动中的伯努利积分	136
习题	141
第五章 旋涡理论基础	146
§ 5-1 涡线、涡管、涡束和旋涡强度	146
§ 5-2 速度环量、斯托克斯(Stokes)定理	148
§ 5-3 速度环量保持不变的汤姆逊定理	153
§ 5-4 涡管特性的亥姆霍兹三定理	155
§ 5-5 二元旋涡的速度和压强分布	158
习题	162
第六章 理想流体平面势流	164
§ 6-1 速度势和流函数	164
§ 6-2 几种简单的平面势流	172
§ 6-3 势流叠加原理	177
§ 6-4 简单势流的叠加	178
§ 6-5 偶极流	180
§ 6-6 流体对圆柱体的无环量绕流	184
§ 6-7 流体对圆柱体的有环量绕流	191
§ 6-8 绕圆球流动	197

§ 6-9	复位势和复速度	202
§ 6-10	作用力与作用力矩的布拉修斯公式	206
§ 6-11	库塔-儒可夫斯基定理	210
§ 6-12	环量 Γ 的确定、翼型后缘无分离绕流的假设	212
习题		219
第七章	粘性流体动力学	222
§ 7-1	粘性流体运动微分方程式	222
§ 7-2	粘性流体的葛罗米柯-斯托克斯方程	236
§ 7-3	G-S 方程的伯努利积分	237
§ 7-4	重力作用下实际流体微小流束伯努利方程式	239
§ 7-5	缓变流动及其特性	240
§ 7-6	动量和动能修正系数	241
§ 7-7	粘性流体恒定总流的伯努利方程	244
§ 7-8	动量方程	247
习题		255
第八章	流体相似原理基础	260
§ 8-1	流体力学相似条件	261
§ 8-2	粘性流体流动的力学相似准数	264
§ 8-3	决定性相似准数	268
§ 8-4	量纲分析方法	271
习题		277
第九章	流体运动阻力与损失	280
§ 9-1	流动阻力的两种类型	280
§ 9-2	粘性流体的两种运动状态	282
§ 9-3	圆管中的层流运动	288
§ 9-4	间隙中的层流运动	295
§ 9-5	圆管中的紊流运动	301
§ 9-6	圆管内均匀紊流的沿程损失	318
§ 9-7	沿程损失系数的实验研究	324
§ 9-8	几种非圆形断面管中的流动	330

§ 9-9 局部阻力与损失计算	337
§ 9-10 流动损失叠加	350
§ 9-11 薄壁小孔口恒定自由出流	351
§ 9-12 圆柱外伸管嘴恒定自由出流	355
习题	365
第十章 管路的水力计算	375
§ 10-1 短管的水力计算	377
§ 10-2 简单长管的水力计算	378
§ 10-3 串联管路的水力计算	380
§ 10-4 并联管路的水力计算	381
§ 10-5 枝状管路的水力计算	382
§ 10-6 环状管网的水力计算	383
§ 10-7 均匀泄流的水力计算	384
§ 10-8 电子计算机在管路计算中的应用	386
§ 10-9 有压管路中的水击	413
习题	425
第十一章 粘性流体绕物体流动	432
§ 11-1 边界层的概念	432
§ 11-2 边界层微分方程	435
§ 11-3 边界层动量积分关系式	440
§ 11-4 边界层的位移厚度和动量损失厚度	444
§ 11-5 平板层流边界层的近似计算	447
§ 11-6 平板紊流边界层的近似计算	450
§ 11-7 二维平板混合边界层近似计算	455
§ 11-8 曲面边界层及其分离	457
§ 11-9 不良流线型体的绕流、卡门涡和绕流阻力	462
§ 11-10 管道入口起始段	466
§ 11-11 小雷诺数平行流绕球体的阻力	472
§ 11-12 自由紊流射流	479
习题	487

第十二章 一元气体动力学基础	490
§ 12-1 基本概念	491
§ 12-2 微小扰动在空气中的传播	499
§ 12-3 气体一元恒定流动基本方程	501
§ 12-4 理想气体一元等熵流动的特征	504
§ 12-5 绝热气流的压缩性影响	510
§ 12-6 气流速度与断面形状间的关系	511
§ 12-7 气体从管嘴的等熵出流	514
§ 12-8 实际气体在管道中的恒定流动	519
习题	530
第十三章 可压缩流体的平面流动	533
§ 13-1 平面马赫波	533
§ 13-2 可压缩流体平面流动的基本方程	537
§ 13-3 普朗特-迈耶流动(绕凸钝角的超声速流动)	540
§ 13-4 小扰动线化法	548
§ 13-5 特征线法	551
§ 13-6 激波及其形成	560
§ 13-7 正激波前后气流参数间的关系	566
§ 13-8 斜激波前后气流参数间的关系	569
§ 13-9 突跃压缩与等熵压缩的比较(朗金-雨贡纽关系式)	574
§ 13-10 激波的相交与反射	576
§ 13-11 缩放喷管在变工况下的流动分析	583
习题	587
参考资料	589

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学研究的内容和方法

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学，是力学的一个重要分支。

流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，确定流体经各种通道及绕流不同物体时速度、压强的分布规律，探求能量转换及各种损失的计算方法，并解决流体与限制其流动的固体壁之间的相互作用问题。

流体力学按其研究内容侧重方面的不同，分为理论流体力学（通称为流体力学）和应用流体力学（通称为工程流体力学）。前者主要采用严密的数学推理方法，力求准确性和严密性。后者则侧重于解决工程实际中出现的问题，而不去追求数学上的严密性。当然，由于流体运动的复杂性，在一定程度上，两种方法都须借助于实验研究，得出经验或半经验的公式。

在实际工程的许多领域里，流体力学一直起着十分重要的作用。无论是水利工程、动力工程、航空工程，还是化学工程、机械工程等都在日益广泛地应用着流体力学。就某种意义而言，也正是在流体力学的研究工作不断取得成就的前提下，才促进了这些部门的大力发展。

流体力学研究的对象包括液体和气体，它们统称为流体。流体力学研究的是流体中大量分子的宏观平均运动规律，而不考虑其具体的分子运动。

工程流体力学主要讲述流体力学的基本概念、基本理论及在

工程实际中的应用。本教材是动力类各专业的教学用书,其研究内容以不可压缩流体的流动为主,但对相应专业所涉及的可压缩流体基本理论也作了必要的阐述。

由于在各种热力动力设备中主要采用水、汽、空气、油、烟气等流体作为工作介质,因此,只有掌握了流体的基本运动规律才能真正了解这些设备的性能和运行规律,才能正确地从事设计和运行管理。所以,工程流体力学是动力类各专业的主要专业基础课程之一。

流体力学作为一门技术科学,研究方法也遵循“实践—理论—实践”的基本规律。其研究过程可大致分为以下步骤:

(1) 对自然界和生产实践中出现的流体力学现象进行观察、研究,从中找出共性问题作为研究课题;

(2) 建立模型,对自然现象和实践问题进行研究、认识,从中找出主要因素,忽略次要因素,建立抽象的数学模型;

(3) 对数学模型进行理论分析和实验研究,总结并验证基本规律,形成理论;

(4) 以得到的基本理论去指导和预言实践,并在实践中检验、修正理论使其完善。

§ 1-2 流体力学发展简史

人类为了生存,自远古以来一直持续不断地与自然界进行着不懈的斗争。流体力学同其它自然科学一样,在斗争中逐渐被人们认识和总结,发展成为自然科学的一个重要的分支。

人们最早对流体知识的认识是从供水、灌溉、航行等方面开始的。在远古时代就在这些方面取得了很大的成就。公元前 2000—1000 年,埃及、罗马、希腊等地的水利工程和普遍发展起来的造船、航海事业就是很好的例证。我们的祖先于远古时代就在水利工程

方面作出过许多杰出的贡献。公元前 2286—2278 年的大禹治水，公元前 300 年成都的都江堰灌渠工程，就是两个驰名中外的典型。而后者至今仍然在农业生产中起着一定的作用。

流体力学作为一门完整的学科发展起来是和历史上许多学者、科学家的努力分不开的。正如奥地利物理学家汉斯·蒂林格在《从牛顿到薛定谔的理论物理学之路》一书中写道：“每一门科学都是用世代研究者无数努力的代价建立起来的大厦。”古今中外许许多多从事流体力学问题的研究者，如同卓越的建筑师，用自己的聪明才智和辛勤劳动的汗水筑成了完整的流体力学“大厦”。

最早从事流体力学现象研究的学者是希腊哲学家阿基米德 (Archimede 公元前 287—212)。他在公元前 250 年写成的《论浮体》一书中提出了流体静力学的基本定律，这是人类历史上最早的水力学著作。正是从这时起，流体流动才开始发展成为一门独立的学科。

在以后的一段较长的历史时期中，没有记载关于流体力学发展的有关资料。

直到 15 世纪末，著名的物理学家和艺术家列奥纳德·达·芬奇 (Leonardo Do Vinci 1452—1519) 在米兰 (Milan) 附近设计和建造了世界上第一个小型水渠。同时，他还比较系统地研究了沉浮问题、孔口出流、物体运动阻力、流体在管路和水渠中流动等问题，从而为水利工程和流体力学问题的研究开辟了一个新的时代。

达·芬奇时代以后，流体力学开始得到了飞速的发展。在 16、17 世纪对流体力学基础理论作出显著贡献的主要有牛顿 (Newton 1642—1727)、伯努利 (Bernoulli 1700—1782)、欧拉 (Euler 1707—1783) 等学者。1612 年伽利略 (Gallileo 1564—1642) 在他的论文中建立了沉浮的基本理论。1643 年托里拆利 (Torricelli 1608—1647) 论证了孔口出流的基本规律。1650 年帕斯卡 (Pascal

1623—1662) 证明了流体中压力传递的基本定律。整个流体静力学部分就是由斯蒂芬(Stevin 1548—1620)、伽里略和帕斯卡等人在这段时期建立的。1686 年牛顿建立了流体内摩擦定律,伽里略、牛顿等人研究了有关阻力的一系列问题,为流体动力学的建立准备了先决条件。

这个时代的理论大都是自然现象和实验的总结。但某些理论与实际之间还存在着很大差异,甚至完全相反。如达朗伯(d'Alembert)提出,当物体在理想流体中运动时,没有对运动的阻力。而实验证明,这个结论是不正确的。这个被人们称为“达朗伯疑难”的问题说明了在那个时代解决流体流动问题中所用理论的局限性。

由于理论分析和实验研究两种方法的侧重不同,从这个时期起在流体流动问题的研究中开始出现了两个体系。一个是以严密的数学推论为主从理论上处理问题,人们称为“理论流体力学”或“流体力学”;另一个以液体流动实践及实验研究为主,侧重于解决工程实际问题,人们称为“水力学”。与此同时派生出另一门重要的学科——“空气动力学”。

这个时期,一大批科学家对理论流体力学作出了卓越的贡献。古典流体力学的创始人——欧拉,于 1755 年导出了描述流体运动的著名的欧拉方程。19 世纪初纳维(Navier)和斯托克斯(Stokes)提出了描述粘性流体运动的运动方程,即著名的 N-S 方程。同时,亥姆霍兹(Helmholtz)和柯希霍夫(Kirchhoff)对旋涡运动和分离流动的理论和实验进行了大量的研究工作,从而解决了许多理论和实验结果之间的矛盾。

在这个阶段,水力学主要是对孔口、管路和各种流道中流动规律的研究。伯努利在创立这一实用科学的过程中曾作出巨大贡献。他在前人研究的基础上,通过自己的大量实验,总结和推导了流体流动过程中能量转换的基本关系,即著名的伯努利方程。由

于在水力学的研究中,实验占主导地位,因此,由实验结果所获得的数据、曲线和表格只在某些情况下能总结为经验公式。而实际的物理过程和经验公式之间的关系往往是不明显的。

19 世纪末到 20 世纪,由于生产力的迅速增长和工业生产的蓬勃发展,大大地加速了流体力学和水力学的发展。许多新兴的工业领域要求人们提供不仅是水,而且还有其它多种流体流动的研究结果。同时,其发展趋势又逐步使两种体系彼此结合起来。在这种结合的过程中,量纲分析和相似原理起着重要的作用。在这一阶段中取得重要成就的典型代表有:(1) 雷诺(Reynolds) 对于流体流动状态(即流态)的研究。他根据实验得出的重要结果指出了流动在客观上存在的两种状态——层流和紊流,找出了判别流态的重要参数——雷诺数。从而为流动的阻力与损失研究奠定了基础。(2) 瑞利(Reyleigh)的量纲分析和雷诺的相似理论解决了流体力学中大量的关键性问题,为理论分析和实验研究沟通了渠道。(3) 在解决流体力学问题中,佛鲁德(Froude)、雷诺等人建立了一系列的数学模型,为相似理论在流体力学中的应用开辟了更为广泛的途径。(4) 普朗特(Prandtl)在 1904 年引进了边界层的概念,建立了理想流体和实际流体研究之间的联系。(5) 齐奥尔科夫斯基(К. Э. Циолковский)、儒可夫斯基(Н. Е. Жуковский)和恰普雷金(С. А. Чаплыгин)等研究了翼栅和绕流理论,奠定了现代空气动力学的基础。

从 20 世纪中叶以后的科学技术发展来看,各工业部门种类日趋复杂,技术问题更趋向于专门化。因此,流体力学必将分离出一系列的独立学科。目前已逐步形成的有电磁流体力学,两相流体力学,流变流体力学,高、超声速气体动力学和稀薄气体动力学等。

现代流体动力学的发展趋向于更为宽广的范围。尤其是计算技术的引入,使以前因过于繁杂的计算而影响进一步探讨的流体力学问题逐步得以解决,从而使流体力学成为医学、气象学、宇宙

航行、海洋学以及各种工程技术的重要组成部分。

§ 1-3 单位制简介

根据国务院发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，本书全部采用法定计量单位，即“SI”制。

目前，在国内外现有的流体力学和水力学、空气动力学等教材中，并存着各种不同的单位制。为便于读者参阅有关的参考文献和书籍，现将并存的几种单位制简介如表 1-1 所示。

表 1-1 公制和英制基本单位

单 位 制		长 度		质 量		力(重量)		时 间		备 注
		名称	代号	名称	代号	名称	代号	名称	代号	
公 制	绝对制	厘米	cm	克	g	达因	dyn	秒	s	CGS制
		米	m	千克 (公斤)	kg	牛顿	N	秒	s	MKS制
	工程制	米	m	质量工 程单位	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	公斤力	kgf	秒	s	MKFS制
英制	绝对程	英尺	ft	磅	lb			秒	s	
	工程制	英尺	ft			磅力	lbf	秒	s	

将法定单位，即（SI）制的基本单位和辅助单位列于表 1-2 中。

目前在工程计算中，仍存在几种单位制。作为一个工程技术人员应熟练地掌握各种单位制之间的换算关系。为查阅方便起见，现将我国目前广泛采用的公制工程制和法定单位制之间的各参数换算关系列于表 1-3 中。

表 1-2 法定单位制(SI)的基本单位和辅助单位

序 号	量的名称	单位名称	单 位 代 号	
			中 文	符 号
基 本 单 位				
1	长 度	米	米	m
2	质 量	千 克	千 克	kg
3	时 间	秒	秒	s
4	电流强度	安 培	安	A
5	热力学温度	开尔文	开	K
6	物质的量	摩 尔	摩 尔	mol
7	发光强度	坎德拉	坎	cd
辅 助 单 位				
1	平面角	弧 度	弧 度	rad
2	立体角	球面度	球面度	sr

表 1-3 SI制与公制工程制单位换算表

物理量	SI制		公制工程制		换算关系
	名称	代号	名 称	代 号	
力	牛顿	N	公斤力	kgf	$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$
压强、应力	帕斯卡	Pa		kgf/cm^2	$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$
密度		kg/m^3		$\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$	$1 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = 9.81 \text{ kg/m}^3$
粘度	帕秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$		$\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	$1 \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 9.81 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
能,功	焦耳	J	公斤力·米	$\text{kgf} \cdot \text{m}$	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.81 \text{ J}$
功率	瓦	W		$\text{kgf} \cdot \text{m/s}$	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 9.81 \text{ W}$

§ 1-4 流体的连续介质模型

流体是指易于流动的物体。就其力学行为来讲,流体可以承受很大的压力,但往往几乎不能承受拉力。对于流体而言,在极小的剪力作用下都将产生无休止的变形,即流动,直到剪力停止为止。而固体则既能承受压力又能承受拉力和剪力。固体在外力作用下会产生变形,但在一定范围内,变形将随外力的消失而消失。由此可以看出,固体有一定的形状,而流体却没有,它取决于盛装流体的容器的形状。

流体分为液体和气体。液体和气体的主要区别之一就是流动性的大小。由于气体远比液体具有更大的流动性,故它总是充满所存在的空间,而液体与气体接触时存在自由表面,只占据容器体积的一部分。这种区别的本质在于二者分子间距相差悬殊,气体分子间距大到使彼此间的牵制力显得很小,不足以造成相互间的约束。而液体分子间的距离较小,彼此的作用力大,使得流体的分子只能在一定的小范围内作无规则运动,不能象气体分子那样,作足以充满空间的自由运动。

液体和气体另一个主要区别在于可压缩性。气体在外力作用下,表现出很大的可压缩性,而液体却不然。例如:水的压强由一个大气压增加到 100 个大气压时,其体积仅减少原体积的 0.5%,而完全气体在等温过程中的体积同绝对压强成反比关系变化。可见两者的可压缩性相差甚远。因此,在研究低速气体(马赫数小于 0.3)流动规律时,将气体看作与液体一样的不可压缩流体处理,但在研究气体的高速流动时,必须考虑气体的压缩性。

从微观角度来看,流体和其它物体一样,也是由大量分子组成的。这些分子总是不停地、杂乱无章地运动着,分子之间存在着间隙。因此,流体实际上并非是连续充满空间的物质。如果从分子