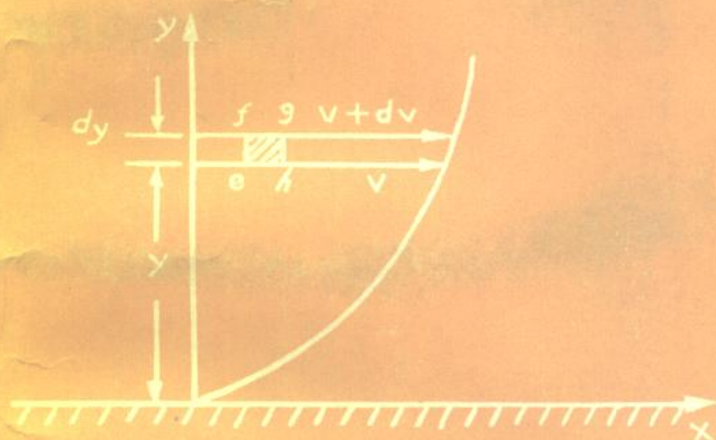


工程流体力学

陈卓如 金朝铭 编



哈尔滨工业大学出版社

TB126
C66

301842

工程流体力学

陈卓如 金朝铭 编



哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书共分十二章。内容包括绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学基础、旋涡理论基础、理想流体有势运动、粘性流体动力学、流动相似原理、流体运动阻力与损失、管路的水力计算、粘性流体绕物体流动和一元气体动力学基础。每章附有一定数量的例题和习题。有关章节中所列图表、数据，对工程设计具有一定的实用意义。

本书为高等院校热能工程专业教材，并可供其它动力类、机械类专业师生及有关科技人员参考。



哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨船舶学院印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张16.375 字数422 000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 1-4 000

书号15341·55 定价3.20元

ISBN 7-5603-0005-7/TK·1

前 言

工程流体力学是热能工程及其相近专业的一门主要技术基础课，为该类专业的专业课程学习打下必要的理论基础，在教材内容上注意了适应专业的需要。流体力学内容十分广泛，即使同一大纲也可以有不同的讲授体系。在本书编写过程中，除注重加强理论基础外，并注重联系工程实际。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与应用条件。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。这样的讲授安排还避免了一些不必要的重复。

本书由陈卓如编写四、五、六、七、八、十一章和部分例题，金朝铭编写第一、三、九、十和十二章，王成敏编写第二章，包钢编写全部习题和大部分例题。全书由陈卓如主编，苏尔皇教授审阅。本书在编写过程中，哈工大流体力学教研室的同志们曾给予了热情支持和帮助，特此深表谢意。

编 者

目 录

第一章 绪论

§ 1-1 流体力学研究的内容及方法	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	29

第二章 流体静力学

§ 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的基本方程式	42
§ 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	50
§ 2-6 重力和其它质量力作用下流体的平衡	54
§ 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	61
§ 2-9 浮力原理、潜体与浮体的平衡和稳定	66
习题	77

第三章 流体运动学

§ 3-1 研究流体运动的两种方法	85
-------------------	----

§ 3-2 恒定流体和非恒定流动, 一元、二元、三元流动	89
§ 3-3 迹线、流线、流束、过流断面和流量	91
§ 3-4 连续性方程	98
§ 3-5 流体微团的运动分解	104
§ 3-6 有旋运动和无旋运动	111
习题	114

第四章 理想流体动力学基础

§ 4-1 理想流体运动微分方程式	118
§ 4-2 运动微分方程式的葛罗米柯—兰姆形式	122
§ 4-3 恒定有旋运动中沿流线的伯努里积分	124
§ 4-4 恒定有势运动中的欧拉积分	126
§ 4-5 非恒定有势运动中的拉格朗日积分	127
§ 4-6 重力作用下的伯努里方程	129
§ 4-7 伯努里方程的意义	130
§ 4-8 相对运动中的伯努里方程	132
§ 4-9 非恒定有旋流动中的伯努里积分	134
习题	140

第五章 旋涡理论基础

§ 5-1 涡线、涡管、涡束和旋涡强度	145
§ 5-2 速度环量、斯托克斯定理	147
§ 5-3 速度环量保持不变的汤姆逊定理	151
§ 5-4 涡管特性的亥姆霍兹三定理	154
§ 5-5 二元旋涡的速度和压强分布	156
习题	161

第六章 理想流体平面势流

§ 6-1 速度势和流函数	164
§ 6-2 几种简单的平面势流	171
§ 6-3 势流迭加原理	176

§ 6-4	简单势流的迭加	177
§ 6-5	偶极流	179
§ 6-6	流体对圆柱体的无环量绕流	183
§ 6-7	流体对圆柱体的有环量绕流	190
§ 6-8	绕圆球流动	196
§ 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	205
§ 6-11	库塔——儒可夫斯基定理	209
§ 6-12	环量 Γ 的确定、翼型后缘无分离绕流的假设	211
	习题	218

第七章 粘性流体动力学

§ 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	235
§ 7-3	G——S方程的伯努里积分	237
§ 7-4	重力作用下实际流体微小流束伯努里方程式	238
§ 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里方程	244
§ 7-8	动量方程	246
	习题	255

第八章 流动相似原理基础

§ 8-1	流动力学相似条件	262
§ 8-2	粘性流体流动的力学相似准数	265
§ 8-3	决定性相似准数	269
§ 8-4	量纲分析方法	272
	习题	278

第九章 流体运动阻力与损失

§ 9-1 流动阻力的两种类型	282
§ 9-2 粘性流体的两种运动状态	284
§ 9-3 圆管中的层流运动	290
§ 9-4 间隙中的层流运动	297
§ 9-5 圆管中的紊流运动	304
§ 9-6 圆管内均匀紊流的沿程损失	320
§ 9-7 沿程损失系数的实验研究	325
§ 9-8 几种非圆形断面管中的流动	331
§ 9-9 局部阻力与损失计算	337
§ 9-10 流动损失迭加	349
§ 9-11 薄壁小孔口恒定自由出流	350
§ 9-12 圆柱外伸管嘴恒定自由出流	354
习题	364

第十章 管路的水力计算

§ 10-1 短管的水力计算	375
§ 10-2 简单长管的水力计算	376
§ 10-3 串联管路的水力计算	378
§ 10-4 并联管路的水力计算	379
§ 10-5 枝状管路的水力计算	380
§ 10-6 环状管网的水力计算	381
§ 10-7 均匀泄流的水力计算	382
§ 10-8 有压管路中的水击	384
习题	395

第十一章 粘性流体绕物体流动

§ 11-1 边界层的概念	402
§ 11-2 边界层微分方程	405
§ 11-3 边界层动量积分关系式	410
§ 11-4 边界层的位移厚度和动量损失厚度	414

§ 11-5 平板层流边界层的近似计算	417
§ 11-6 平板紊流边界层的近似计算	421
§ 11-7 二维平板混合边界层近似计算	425
§ 11-8 曲面边界层及其分离	428
§ 11-9 不良流线型体的绕流、卡门涡和绕流阻力	432
§11-10 管道入口起始段	436
§11-11 小雷诺数平行流绕球体的阻力	441
§11-12 自由紊流射流	449
习题	458
第十二章 一元气体动力学基础	
§ 12-1 基本概念	462
§ 12-2 微小扰动在空气中的传播	470
§ 12-3 气体一元恒定流动基本方程	472
§ 12-4 理想气体一元等熵流动的特征	475
§ 12-5 绝热气流的压缩性影响	481
§ 12-6 气流速度与断面形状间的关系	482
§ 12-7 气体从管嘴的等熵出流	485
§ 12-8 实际气体在管道中的恒定流动	489
习题	500
习题参考答案	504
参考资料	511

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学研究的内容及方法

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阻力损失的计算方法，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，还是化工工程、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。

工程流体力学讨论的内容主要是流体力学的基本理论、基本概念及在工程实际中的应用。因本教材作为热能工程专业的教学用书，其研究内容以不可压缩流体管内流动为主，对热能工程中所涉及的必要的可压缩流体基本理论作了必要的阐述，偏重于讲述从事热能工程研究、设计和计算所必备的基础知识。

热能工程专业是为热能工程培养高级工程技术人材。由于在各种热力设备中主要采用水、汽、空气、烟气等流体作为工作介质，因此，只有掌握了各种流体在热力设备中的流动规律才能真正了解这些设备的性能和运行规律。所以，工程流体力学是热能工程专业的专业基础课程之一。

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知识一样，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—000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。

直到十五世纪末，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，从而为水力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。在十六、十七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）、伯努里（Bernoulli 1700—1782）、欧拉（Euler 1707—1783）等学者。1612年伽里略（Gallileo 1564—1642）在他的论文中建立了沉浮的基本理论。1643年托里折利

(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”;另一个以流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。十九世纪初纳维(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,亥姆霍茨(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。伯努里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,即著名的伯努里方程。

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。

十九世纪末到二十世纪，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) 瑞莱夫(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。

从二十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	绝对制	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,

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

续 1—2

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

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 1-3 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	$1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{Pa}$
密 度		kg/m^3		$\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$	$1\text{kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4 = 9.81\text{kg}/\text{m}^3$
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		$\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$	$1\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{s} = 9.81\text{W}$

§ 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，流体可以承受压力，不能承受拉力。在无论怎样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。而固体却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形变，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易流动性，故它总是充满所存在的空间。而液体却存在着自由表面，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%；而气体的体积随压强成反比关系变化。可见两者的可压缩性相差甚远。因此，流体力学在研究气体和液体的流动规律时，无论在内容上还是在方法上都有所不同。

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。如果从分子运动入手来研究流体流动的规律，显然将十分困难，甚至难以进行。而流体力学研究的是在外力（如重力、压力、摩擦力等）作用下流体平衡和运动的规律，所研究的是大量分子的平均行