



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

流体力学

Fluid Mechanics

林建忠 阮晓东 陈邦国 编著
王建平 周洁 任安禄



清华大学出版社



Springer



高等院校力学教材
Textbook in Mechanics for Higher Education

流体力学

Fluid Mechanics

林建忠 阮晓东 陈邦国 编著
王建平 周 洁 任安禄



清华大学出版社
北京 /



Springer

内 容 提 要

本书共分 12 章,内容包括流体的物理性质、流体运动及其基本方程、流体静力学、无粘性流体的一维和平面运动、粘性流体的一维运动、层流和湍流基本问题的解法、可压缩气体动力学、两相流动基础、计算流体力学以及流体力学实验基础等。本书的特点是简明清晰的系统表述、理论与工程应用的有机贯穿、涵盖较宽的专业题材、提供较全的公式图表。

本书可作为力学、动力、机械、能源、化工、航空航天、水利、造船、海洋工程等本科专业的基础课教材或教学参考书,也可供有关专业从事科研、教学及工程工作的研究生和科技人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/林建忠等编著. —北京:清华大学出版社,2005.9

(高等院校力学教材)

ISBN 7-302-11164-2

I. 流… II. 林… III. 流体力学—高等学校—教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 059570 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:杨 倩

印 装 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:175×245 印张:35 字数:725 千字

版 次:2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-11164-2/O · 469

印 数:1~3000

定 价:45.00 元

前 言

大千世界,被冠之以“流体”的流动介质无所不在. 流体力学研究在各种力的作用下,流体的静止和运动状态以及流体和其他物体有相对运动时的相互作用和流动规律. 流体力学既是探索自然规律的基础学科,也是解决工程实际问题的应用学科,它在现代科学中占有重要的地位. 事实上,它已成为当今科学和工程技术的基础之一.

有鉴于此,目前很多专业和学科都把流体力学作为专业的基础课程,国内外也出版了很多的流体力学教科书,其中不乏上乘之作. 可以把目前有关的教科书分为两类,一类侧重于基本概念和基础理论的描述,适合于力学专业的学生;另一类则侧重于流体力学在工程技术中的应用,适合于工科专业的学生. 本书试图将系统的理论叙述与实际的工程应用有机地结合起来,同时尽可能涉及当今构成流体力学的基本元素,诸如流体力学问题的计算和实验,并且涵盖与气体动力学相关的可压缩流动、粘性流体动力学和两相流动,使得本书具有较宽的适用面.

本书作者长期从事本科生和研究生流体力学课程的授课工作,在流体力学的教学方面积累了较丰富的经验. 全书共 12 章,其中陈邦国编写第 1、3、4 章;阮晓东编写第 2、6.2.1、6.3~6.8、11 章;林建忠编写第 7、8 章以及第 6 章的 6.1、6.2.2~6.2.4;王建平编写第 9、10 章;周洁编写第 5 章;任安禄编写第 12 章. 最后由林建忠负责定稿.

由于编者水平有限,谬误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正.

作 者

2005 年 4 月于浙江大学求是园

符 号 表

英文符号	量的含义		
a :	声速, 动能修正系数	m :	质量
a :	加速度	$\dot{m}$:	质量流量
A :	面积	M :	分子量
B :	压缩系数; 驻点速度	M :	力矩
c_i, c_r :	波相速度	n :	粘度幂次律指数; 量纲指数; 转速
c_p, c_v :	比定压热容和比定容热容	N :	功率
C :	常数	p :	压力, 压强
C_m :	流量系数	p :	应力矢量
D :	阻力; 扩散系数	$\hat{p}$:	有效压力 ($p + \rho g z$)
e :	比内能	P :	压力; 浮力; 管道周长;
e_{ij} :	应变率张量	P :	应力张量; 压力
E :	内能; 偏心距; 杨氏弹性模量	q :	热流密度
E :	应变率张量	Q :	热量; 流量
f, F :	力	(r, θ, z) :	柱坐标
f, g :	相似变量	r :	位置矢径
g :	重力加速度	r :	恢复因子; 汽化潜热
G :	质量流量; 切变模量	r_h :	水力半径
h :	能量损失; 比焓; 水头; 管道厚度	r_0 :	圆柱半径
h_0 :	驻点焓	R :	半径; 气体常数
H :	形状因子 (δ^* / θ); 焓	(R, θ, φ) :	球坐标
I :	单位张量	s :	比熵; 滑动比
J :	惯性矩; 射流动量	t :	时间
k :	导热系数或热导率; 粗糙高度; 湍动能	T :	热力学温度
k :	动量	u, v, w :	笛卡儿速度分量
K :	体积模量; 管道入口段压降参数; 绝热指数	u', v', w' :	湍流脉动速度分量
l :	分子平均自由程; 混合长度	U, V, W :	平均速度分量
L :	特征长度	v :	比体积; 速度
		v_r, v_θ, v_z :	柱坐标速度分量
		v_r, v_θ, v_φ :	球坐标速度分量
		v_1, v_2, v_3 :	一般速度分量

v^* :	壁摩擦速度 $(\tau_w/\rho)^{1/2}$	μ :	动力粘度
V :	速度矢量	ν :	运动粘度
V_r :	相对速度	Π :	科尔斯(Coles)尾流参数; 质量力势函数
w :	比功	ρ :	密度
w_0 :	循环速度	σ :	分子碰撞直径; 湍射流增长参数; 气穴系数
W :	功; 尾迹函数	τ :	体积, 切应力
x, y, z :	笛卡儿坐标	τ_{ij} :	应力张量
x :	坐标矢量	ϕ :	速度势; 速度系数; 真实含气率(空隙率)
x_1, x_2, x_3 :	坐标分量		
Z :	气体可压缩性 $p/(\rho RT)$		

希腊文符号

量的含义

α :	热扩散率 $K/(\rho c_p)$; 波数; 压力梯度参数; 楔角
β :	热膨胀系数; 克劳泽(Clausser)参数; 热传递参数; 容积含气率; 动量修正系数
γ :	重度; 比热比; 表面张力; 间隙因子
Γ :	欧拉常数; 速度环量
δ, δ_u :	速度边界层厚度
δ_T :	温度边界层厚度
δ_h :	焓厚度
δ_s :	耗散厚度
δ_c :	热传导厚度
Δ :	管壁绝对粗糙度; 亏损厚度
ϵ :	湍流耗散; 相对偏心距
ϵ_m :	涡粘性系数
ζ :	圆柱绕流变量
η :	相似变量; 效率
θ :	动量损失厚度, 转动角度
Θ :	无量纲热力学温度
κ :	卡门(Kármán)常数, 0.4
λ :	管道摩擦因子或沿程阻力系数; 速度系数
Λ :	波毫森(Pohlhausen)参数

Φ :	粘性耗散函数
χ :	湿周; 质量含气率(干度)
X :	粘性相互作用参数
ψ :	流函数
ω :	涡量; 角频率
Ω_v, Ω_D :	分子势函数
Ω :	角速度矢量

量纲为 1 的参数

Ca :	空泡数
CD :	阻力系数
C_f :	表面摩擦系数
St :	斯坦顿(Stanton)数
CP :	压力系数
CM :	力矩系数
Ec :	埃克特(Eckert)数
Eu :	欧拉(Euler)数
Fr :	弗劳德(Froude)数
Gr :	格拉晓夫(Grashof)数
Kn :	克努森(Knudsen)数
Le :	路易斯(Lewis)数
Ma :	马赫(Mach)数
Ne :	牛顿(Newton)数
Nu :	努塞尔(Nusselt)数
Pr :	普朗特(Prandtl)数

Ra :	瑞利(Rayleigh)数
Re :	雷诺(Reynolds)数
Ro :	罗斯比(Rossby)数
Sc :	施密特(Schmidt)数
Sr :	斯特劳哈尔(Strouhal)数
We :	韦伯(Weber)数

下角符号 含 义

a :	空气
B :	布拉修斯(Blasius)层
c :	临界值
e :	自由来流;外部势流
f :	流体
g :	气体
l :	液体;层流
m :	模型
n :	法向
o :	特征量

r :	恢复
t :	湍流;实物
tr :	转换
x :	在 x 处
ν :	粘性
w :	水;壁面
0 :	初始值;滞止状态
∞ :	无穷远

上角符号 含 义

$-$:	平均
$'$:	微分;湍流脉动;液相物理量
$''$:	气相物理量
o :	量纲数为 1 的量
$*$:	量纲数为 1 的量
$+$:	壁面律变量
$\sim$:	小扰动变量

目 录

符号表	III
-----------	-----

第 1 章 流体物理性质与运动的描述	1
1.1 流体质点与连续介质假设	1
1.1.1 流体的定义和特征	1
1.1.2 流体力学的研究内容和方法	2
1.1.3 流体质点与连续介质假设	2
1.1.4 流体物理量	4
1.2 流体的可压缩性与热膨胀性	4
1.2.1 流体的密度与比体积	4
1.2.2 流体的可压缩性与热膨胀性	5
1.2.3 不可压缩流体假设	6
1.3 流体的粘性与导热性	7
1.3.1 流体的粘性	7
1.3.2 牛顿粘性定律	7
1.3.3 流体的粘度	8
1.3.4 牛顿流体与非牛顿流体	9
1.3.5 无粘性流体的假设	10
1.3.6 流体的导热性	10
1.4 流体运动的两种描述方法及互相转换	11
1.4.1 拉格朗日描述法	11

1.4.2 欧拉描述法	12
1.4.3 拉格朗日描述法与欧拉描述法之间的联系	12
1.5 质点的随体导数	13
1.5.1 拉格朗日描述中的随体导数	13
1.5.2 欧拉描述中的随体导数	13
1.5.3 拉格朗日描述法与欧拉描述法的互相转换	15
1.6 迹线与流线、流管与流量	18
1.6.1 迹线	18
1.6.2 流线	19
1.6.3 脉线	21
1.6.4 流管与流束	22
1.7 运动流体的应变率张量	23
1.7.1 亥姆霍兹速度分解定理	24
1.7.2 流体微团的运动分析	26
1.7.3 流体运动的分类	29
1.8 流体中的作用力与应力张量	31
1.8.1 体积力	31
1.8.2 表面力与应力	32
1.8.3 流场中任一点上的应力状态——应力张量	33
1.8.4 静止流体与运动的无粘性流体中的应力张量	34
附录 I 笛卡儿张量简介	35
习题	41
 第 2 章 流体静力学	 47
2.1 流体静压强及其特性	47
2.2 静止流体的平衡微分方程	49
2.3 重力场中静止流体内的压力分布	52
2.4 静压力的计量	53
2.5 流体的相对平衡	54
2.6 静止流体作用在物面上的总压力计算	57
2.6.1 平面和曲面上的总压力	57
2.6.2 浮力	60
2.7 大气的平衡	61
习题	66

第 3 章 流体运动基本方程	72
3.1 流体的系统与控制体	72
3.1.1 流体的系统	72
3.1.2 流场中的控制体	73
3.1.3 流体运动应遵循的基本定律	73
3.1.4 体积分的随体导数	74
3.1.5 基本方程表达形式的选择	76
3.2 流体运动的连续性方程	76
3.2.1 积分形式的连续性方程	76
3.2.2 微分形式的连续性方程	78
3.2.3 体积分随体导数的另一种表达式	81
3.3 流体的运动方程	82
3.3.1 积分形式的运动方程	82
3.3.2 微分形式的运动方程	83
3.3.3 粘性流体的运动微分方程	85
3.3.4 无粘性流体的运动微分方程	88
3.4 流体运动的能量方程	89
3.4.1 积分形式的能量方程	89
3.4.2 微分形式的能量方程	90
3.4.3 牛顿流体的内能方程	91
3.5 流体的热力学状态方程	93
3.5.1 流体的热动平衡假设	93
3.5.2 流体的状态方程	94
3.5.3 常比热容完全气体的热力学关系式	95
3.5.4 正压流体与斜压流体	95
3.6 流体动力学基本方程组的封闭性及定解条件	96
3.6.1 流体力学分析方法的一般过程	96
3.6.2 流体力学的理论模型	97
3.6.3 几种常用模型的封闭方程组	97
3.6.4 初始条件与边界条件	103
附录 II 正交曲线坐标系中流体运动的基本方程组	108
习题	114

第 4 章 无粘性流体的一维流动	119
4.1 流体运动的一维模型及基本方程	119

4.1.1	一维流动模型	119
4.1.2	无粘性流体一维流动的基本方程	120
4.2	不可压缩流体的伯努利方程及其应用	126
4.2.1	无粘性流体运动方程的简化	126
4.2.2	定常流动的伯努利积分	127
4.2.3	伯努利方程的物理意义和几何意义	129
4.2.4	伯努利方程的基本应用	130
4.2.5	伯努利方程的推广应用	135
4.2.6	非定常流动中的伯努利方程	139
4.2.7	非惯性坐标系中的伯努利方程	141
4.3	动量定理及其应用	144
4.3.1	动量方程及其简化	144
4.3.2	动量方程的应用	145
4.3.3	轴流式涡轮机的欧拉方程	147
4.3.4	非惯性坐标系中的动量定理	150
4.4	动量矩定理及其应用	152
4.4.1	积分形式的动量矩方程	152
4.4.2	径流式涡轮机的欧拉方程	153
4.4.3	非惯性坐标系中的动量矩定理及其应用	154
	习题	156

第5章	无粘性流体的平面二维流动	163
5.1	流体的有旋运动和无旋运动	163
5.2	涡线、涡管、涡束、涡通量	166
5.3	速度环量、斯托克斯定理	168
5.4	无粘性流体兰姆-葛罗米柯型微分方程及应用	171
5.5	欧拉积分式和伯努利积分、伯努利方程	173
5.6	汤姆孙定理、亥姆霍兹旋涡定理	176
5.6.1	汤姆孙定理	176
5.6.2	亥姆霍兹旋涡定理	178
5.7	有势流动、速度势函数、流函数、流网	179
5.7.1	有势流动和速度势函数	179
5.7.2	流函数与流网	183
5.8	不可压缩平面二维无旋基本流动	187
5.8.1	均匀直线流动(平行流)	188

5.8.2 点源和点汇	189
5.8.3 涡流和点涡	190
5.9 简单的平面无旋流动的叠加	194
5.10 无环量绕圆柱体的不可压缩二维无旋流动	201
5.11 有环量绕圆柱体的不可压缩二维无旋流动	205
5.12 不可压缩流体绕流平面叶型的库塔-儒可夫斯基升力定理	209
习题	212
第 6 章 粘性不可压缩流体的一维流动	215
6.1 量纲数为 1 的 N-S 方程及流动相似律	215
6.1.1 量纲数为 1 的 N-S 方程	215
6.1.2 量纲为 1 的参数	216
6.1.3 流动相似律	217
6.2 粘性流体运动的两种流态——层流和湍流	218
6.2.1 雷诺实验	218
6.2.2 湍流的一般定义和描述	220
6.2.3 湍流的统计平均	220
6.2.4 不可压缩湍流平均运动的基本方程	222
6.3 圆管中的充分发展层流与湍流	223
6.3.1 圆管中的层流	223
6.3.2 圆管中的湍流	227
6.4 管流的沿程压力损失和局部阻力损失	235
6.4.1 沿程压力损失	235
6.4.2 局部阻力损失	239
6.5 粘性总流的伯努利方程及其应用	244
6.5.1 粘性总流的伯努利方程	244
6.5.2 伯努利方程的应用	247
6.5.3 沿程有能量输入或输出的伯努利方程	249
6.6 管路的水力计算	250
6.6.1 短管	251
6.6.2 长管	255
6.7 缝隙中的流动	262
6.7.1 平行平板间缝隙流动	262
6.7.2 圆柱环形缝隙流动	265
6.7.3 倾斜平板间缝隙流动	267

6.7.4	圆锥缝隙流动	270
6.7.5	平行圆盘缝隙流动	271
6.8	孔口出流	274
6.8.1	孔口出流的分类和基本特征	274
6.8.2	薄壁孔口自由出流	276
6.8.3	薄壁孔口淹没出流	278
6.8.4	厚壁孔口自由出流	280
6.8.5	节流气穴与汽蚀	283
	习题	284
第7章	粘性流体层流的基本运动	291
7.1	N-S方程的小雷诺数近似解	291
7.1.1	斯托克斯方程	291
7.1.2	绕圆球小雷诺数流动的斯托克斯解	292
7.1.3	绕圆球小雷诺数流动的奥辛解	295
7.2	两平行平板间的二维流动	297
7.2.1	二维泊肃叶流	297
7.2.2	纯剪切流	298
7.2.3	二维库特流	298
7.3	附壁面流动边界层的基本概念与特征量	299
7.4	不可压缩二维层流边界层微分方程	300
7.5	不可压缩二维边界层的动量积分关系式	302
7.5.1	位移厚度	302
7.5.2	动量损失厚度	303
7.5.3	能量损失厚度	304
7.5.4	卡门动量积分方程	304
7.6	定常不可压缩二维层流边界层的布拉修斯相似性解	306
7.7	可压缩层流边界层	310
7.7.1	可压缩二维层流边界层方程	310
7.7.2	完全气体定常可压缩二维层流边界层的相似性解	311
7.7.3	可压缩二维边界层的积分关系式	312
	习题	314
第8章	粘性流体湍流的基本运动	316
8.1	湍流的模式理论	316

8.1.1 湍流模式建立的依据	317
8.1.2 一阶封闭模式	318
8.1.3 雷诺应力模式	321
8.1.4 代数应力模式	323
8.1.5 二方程模式	324
8.1.6 双尺度模式	325
8.1.7 一方程模式	325
8.1.8 各种模式的比较	326
8.2 二维边界层	326
8.2.1 湍流边界层的结构	326
8.2.2 二维湍流边界层方程	329
8.2.3 边界层的转换过程	330
8.2.4 影响边界层转换的几个因素	332
8.2.5 转换位置的预测	333
8.2.6 层流边界层分离	334
8.2.7 湍流边界层分离	335
8.2.8 边界层分离后的再附	337
8.3 平板不可压缩二维湍流和混合边界层的近似计算	338
8.3.1 定常不可压缩二维湍流边界层的动量积分关系式解法	338
8.3.2 平板不可压缩二维层流-湍流混合边界层的近似计算	343
8.4 绕圆柱体的不可压缩二维流动	344
8.4.1 绕圆柱体不可压二维边界层	344
8.4.2 绕圆柱流场与 Re 数的关系	347
8.5 湍尾流场	348
8.6 可压缩二维湍流边界层方程	352
8.7 绕流阻力与边界层控制	353
8.7.1 绕流阻力	353
8.7.2 边界层控制	354
习题	355
第9章 气体动力学基础	357
9.1 压力波的传播、声速	357
9.2 运动点扰源产生的扰动场、马赫数与马赫角	360
9.3 可压缩流体运动的三种参考状态	361
9.4 可压缩流体一维定常等熵流动的伯努利方程及其应用	362

9.4.1 一维定常等熵流动的基本方程	363
9.4.2 一维定常等熵流动的伯努利方程及其应用——喷管	365
9.5 流动通道中两个不同截面上参数变化与马赫数的关系	369
9.5.1 任意两截面间同名参数比与马赫数的关系	369
9.5.2 任意截面上的参数与临界参数、滞止参数之间的关系 及其速度系数 λ	371
9.6 不可压缩流体伯努利方程的应用范围	374
9.7 正激波	375
9.7.1 正激波的形成机理、传播速度及蓝金-许贡纽公式	376
9.7.2 正激波前、后气流参数的关系	378
9.8 超声速气流绕流外凸或内凹固壁面的流动	382
9.8.1 膨胀波	382
9.8.2 微弱压缩波	383
9.9 斜激波	384
9.9.1 斜激波的形成	384
9.9.2 斜激波前、后气流参数的关系	385
9.9.3 超声速气流折转角 δ 和斜激波角 β 的关系	388
9.10 超声速喷管在非设计工况下的流动分析	390
附录Ⅲ 气体动力函数表	392
附录Ⅳ 正激波表	394
习题	400
第10章 两相流动基础	403
10.1 气液两相流动的参数及其意义	403
10.1.1 气液两相流动的参数	404
10.1.2 气液两相流动的流型	408
10.2 气液两相流动的均流模型与分流模型	412
10.2.1 气液两相流动的均流模型	412
10.2.2 两相流动的分流模型	415
10.3 气液两相流动中摩擦阻力、局部阻力及真实含气率的计算	418
10.3.1 气液两相流动中摩擦阻力的计算	418
10.3.2 气液两相流动中真实含气率的计算	427
10.3.3 气液两相流动的局部阻力	431
10.4 固定床气固两相流的基本原理	435
10.4.1 床层结构参数	435

10.4.2 床层阻力	436
10.5 流化床气固两相流的基本原理	438
10.5.1 流化现象	438
10.5.2 临界流化速度和流化床的压降	439
10.6 悬浮状气固两相流的基本原理	441
习题	442
第 11 章 流体力学实验基础	444
11.1 相似理论和量纲分析	444
11.1.1 相似理论	444
11.1.2 量纲分析	449
11.2 流体力学实验设备简介	453
11.2.1 风洞的功能与分类	453
11.2.2 低速风洞	454
11.2.3 超声速风洞	459
11.2.4 水流循环系统	462
11.3 流动参数测量	462
11.3.1 压力的测量	462
11.3.2 流速的测量	468
11.3.3 流量的测量	471
11.4 流动显示技术	476
11.4.1 常规流动显示	476
11.4.2 粒子图像测速技术	479
习题	483
第 12 章 计算流体力学基础	484
12.1 计算流体力学概述	484
12.2 有限差分法	486
12.2.1 有限差分法概念	486
12.2.2 相容性、收敛性和稳定性	488
12.3 模型方程的差分格式	490
12.3.1 波动方程	490
12.3.2 热传导方程	491
12.3.3 无粘性伯格斯方程	492
12.4 冯·诺伊曼稳定性分析法和其他著名的差分格式	492

12.5	稳定性分析的其他方法和修正方程的概念	495
12.6	二维、三维模型方程的差分格式	497
12.7	无旋流动的差分计算方法	499
12.7.1	高斯-塞德尔迭代法	499
12.7.2	线迭代法	500
12.7.3	等步长点迭代法	501
12.8	二维不可压缩粘性流动涡量流函数法	502
12.8.1	网格设计	505
12.8.2	程序框图	506
12.9	平板边界层方程的差分解法	507
12.10	N-S 方程的有限差分法	508
12.10.1	压强校正法	510
12.10.2	投影法和人工压缩性法	514
12.10.3	哈罗-泊松方程法和非交错网格下的应用	517
12.10.4	Beam-Warming 差分格式	518
12.11	非结构网格有限体积法	519
12.11.1	非结构网格的几何描述	520
12.11.2	扩散方程的离散格式	520
12.11.3	对流扩散方程的离散格式	522
12.11.4	流动方程组的离散格式	523
	习题	525
	习题答案	527
	中英文人名对照表	538
	参考文献	540