

816017

3326

高等学校试用教材

40177

粘性流体力学

南京工学院 华中工学院 合编
重庆大学 天津大学



高等教育出版社

高等学校试用教材

粘性流体力学

南京工学院 华中工学院
天津大学 重庆大学 合编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是按照1985年2月召开的工程热物理专业(四年制)粘性流体力学教学讨论会制定的编写大纲编写的。

本书在工程流体力学的基础上,介绍了可压缩和不可压缩粘性流体运动的基本方程。围绕不可压缩粘性流体阐明了有关方程求解的各种方法。全书重点在于解决粘性流体的流动阻力和流场等问题。对于湍流半经验理论及其应用,以不可压缩流体为主作了较系统的阐述。有关可压缩流动及温度边界层等较复杂的问题,也作了适当介绍。

全书共12章,书末有附录。全书采用我国法定计量单位。

本书经国家教委高等工业学校工程热物理专业教材委员会审查同意作为工程热物理专业的教材,也可作为某些力学专业粘性流体力学课程的教学用书,并可供有关专业的研究生、科学技术人员参考。

高等学校试用教材

粘 性 流 体 力 学

南京工学院 华中工学院
天津大学 重庆大学 合编

高等教育出版社出版
新华书店上海发行所发行
上海印刷三厂印装

开本850×1168 1/32 印张17.375 字数417,000

1987年6月第1版 1987年6月第1次印刷

印数00,001—2,450

书号15010·0851 定价3.10元

前 言

本书是按照1985年2月召开的工程热物理专业(四年制)粘性流体力学教学讨论会制定的编写大纲编写的。内容反映了南京工学院、华中工学院、天津大学、重庆大学等四所院校近几年来工程热物理专业粘性流体力学课程的教学经验,也汲取了上海机械学院等单位的有益经验。

粘性流体力学是流体力学的一个重要分支,广泛应用于动力、化工、机械、航空、采暖通风、水利、海洋、气象、环保等部门。工程实际中有关粘性流体力学的问题早期多依靠实验来解决,有较大的局限性。随着科学技术的进步,粘性流体力学,特别是边界层理论有了很大发展。目前,以理论分析为指导,结合实验和数值计算,已能解决许多工程实际中的粘性流体流动问题。因此,对于在上述领域工作的现代工程技术人员,具备一定的粘性流体力学的理论知识已日益显得重要。

本书在工程流体力学的基础上,介绍可压缩和不可压缩粘性流体运动的基本方程,围绕不可压缩粘性流体阐明了有关方程求解的各种方法。有关较复杂的可压缩流动,则放在后面作为选讲内容。教材的重点放在培养学生解决二维粘性流动阻力和流场等问题。对于湍流半经验理论及其应用以不可压缩流动为主作了较系统的阐述,为解决复杂的工程湍流问题奠定基础。另外,从教材的通用性与系统性出发,有少量内容仍会与多学时工程流体力学中的粘性流体部分有交叉,编写时注意避免简单的重复。在数学处理上,大部分采用直角(笛卡尔)坐标系和常见的速度分量的表示方法,有些地方用矢量形式表示,在适当的地方注明张量的表达形式。在附录A中介绍了初步的张量知识。

本书由南京工学院(刘明杰、张占渔)、华中工学院(李国钧)、天津大学(杨宣堂)、重庆大学(黄性、况文仲)合编。南京工学院主编,华中工学院主审。第一、四章及附录C由况文仲编写,第二、三章及附录B由杨宣堂编写,第五、六章由黄性编写,第七、九章及附录A由张占渔编写,第八、十章及引言由刘明杰编写,第十一、十二章由李国钧编写。全书由刘明杰负责主编工作,潘衍强主审。姚扬猷、赵耕夫审阅了有关章节,提供了许多有益的意见。

本书经国家教委高等工业学校工程热物理专业教材委员会复审通过,可作为工程热物理专业的教材。从课程的内容与性质来看,也可作为某些力学专业粘性流体力学课程教学用参考书或教材,而且还可作为与工程热物理学科相近的工程类专业研究生的参考书。为兼顾某些院校力学等有关专业的需要,书中增加了不可压缩温度边界层一章,工程热物理专业可根据情况选用。教材中有一些偏深的内容标以“*”或以小号字编排,以供教学中取舍。

限于时间和编者水平,书中不当与错误之处在所难免,欢迎读者指正。

编 者

主要符号说明

拉丁字母

A	面积	k	湍流导热系数
a	加速度, 声速, 导温系数	l	普朗特混合长度
c_p	定压比热容	n	法线方向的单位矢量
c_v	定容比热容	p	压力(单位面积上的压力)
D	阻力, 耗散积分, 扩散系数	Q	体积流量, 对流换热量
D_f	壁面摩擦阻力	q	单位面积的热流量
e	内能	q_w	壁面单位面积的热流量
F	力, 湍流壁面律普遍函数	r	轴对称流动流场中某点至几何轴线的垂直距离, 复温因子
f	单位质量的质量力, 相似解中的无量纲流函数, 湍流对数律函数	s	熵
G	湍流亏损律普遍函数	T	温度
g	重力加速度, 湍流按速度亏损表示的对数律函数	t	时间, 摄氏温度
H	形状因子, 总焓	U_e	边界层外部势流速度
H_1, H_2, H_3	拉梅系数	U_∞	自由来流速度
h	焓, 高度	u_{av}	断面平均速度
$[I]$	单位张量	V	体积
K	湍动能	V	速度
k	导热系数	v^*	壁面摩擦速度
		W	尾流函数

希腊字母

α	角度, 放热系数	Γ	速度环量
β	体膨胀系数, 弗克纳-斯肯参数	γ	绝热指数(比热比), 间歇因子

Δ	动能损失厚度	μ	粘性系数(动力粘性系数)
δ	厚度, 间隙, 速度边界层厚度	μ'	第二粘性系数
δ_t	温度边界层厚度	μ_t	湍流(动力)粘性系数
δ^*	速度边界层排挤(位移)厚度	ν	运动粘性系数
e_m	涡粘性系数(湍流运动粘性系数)	Π	尾流参数
ϵ	变形率	ρ	密度
e_{ij}	变形率张量分量	τ	粘性流体的应力, 切应力
Θ	无量纲温度	τ_t	湍流切应力
θ	角度, 柱坐标系和球坐标系的 角度坐标	τ_w	壁面切应力
θ	动量损失厚度	τ_{ij}	应力张量分量
κ	卡门常数, $\kappa \approx 0.40 \sim 0.41$	Φ	耗散函数
λ	应力与变形率关系式中的系数, 沿程阻力系数	φ	速度势函数
		ψ	流函数
		Ω	涡量
		ω	旋转角速度

坐标系及速度分量

x, y, z	} 直角坐标系坐标	e_r, e_θ, e_ψ	球坐标系坐标轴的单位
x_1, x_2, x_3			矢量
q_1, q_2, q_3	正交曲线坐标系坐标	u, v, w	} 直角坐标轴方向的速度
r, θ, z	柱坐标系坐标	u_1, u_2, u_3	
r, θ, ψ	球坐标系坐标	V_1, V_2, V_3	正交曲线坐标轴方向的速度分量
i, j, k	直角坐标系坐标轴的单位矢量	u_r, u_θ, u_ψ	柱坐标轴方向的速度分量
e_1, e_2, e_3	正交曲线坐标系坐标轴的单位矢量	u_r, u_θ, u_ψ	球坐标轴方向的速度分量
e_r, e_θ, e_z	柱坐标系坐标轴的单位矢量		

系数 准则数

C_D	阻力系数, 耗散积分系数	Pe	贝克来数
C_f	壁面摩擦阻力系数(局部)	Pr	普朗特数
$\bar{C}_f$	平均壁面摩擦阻力系数	Pr_t	湍流普朗特数
EC	埃克特数	Re	雷诺数
Fr	弗劳德数	Sr	斯特劳哈尔数
Gr	葛拉晓夫数	St	斯坦顿数
Nu	努塞尔数	M	马赫数

下 标

a	绝热	S	分离点
av	平均	t	湍流
aw	绝热壁面	tr	转换点, 过渡点
e	外边界势流	i	不稳定点
l	层流	w	壁面
n	法线方向	∞	自由来流, 无穷远
0	起始点		

上 标

$-$	时平均, 统计平均, 沿壁面平均		中的小扰动
$'$	导数(微商); 相对于时平均值	$*$	参考速度, 参考温度, 无量纲量
	的湍流脉动, 层流稳定性分析	$+$	内层壁面律无量纲量

目 录

主要符号说明	1
引言	1
第一章 粘性流体运动的基本概念	5
1-1 概述	5
1-2 粘性流体中的力和应力	6
1-3 流体微团的运动分析和变形率	10
1-4 本构方程(广义牛顿内摩擦定律)	14
1-5 粘性流体的传输性质	20
1-6 层流与湍流	24
第二章 粘性流体运动的基本方程和基本性质	26
2-1 连续性方程	26
2-2 粘性流体的运动方程	29
2-3 能量方程	33
2-4 状态方程	39
2-5 粘性流体运动方程组的封闭性和定解条件	41
2-6 粘性流体运动方程组的无量纲化和无量纲参数	44
2-7 粘性流体运动的涡量传输方程	49
2-8 粘性流体运动的基本性质	51
第三章 粘性流体运动方程的解	56
3-1 粘性流体运动方程组的讨论和解的分类	56
3-2 两平行平板间的定常流动	57
3-3 不平行平板间的剪切流动	63
3-4 旋转圆筒间粘性流体的定常流动	67
3-5 充分发展的管内定常流动	76
3-6 具有运动边界的非定常流动	82
3-7 粘性流体绕圆球的缓慢运动	85

3-8	数值解法简介	95
第四章	二维层流边界层微分方程及其相似性解	103
4-1	边界层流动的基本概念	103
4-2	边界层的各种厚度	105
4-3	边界层微分方程	110
4-4	边界层的分离现象	118
4-5	沿平板层流边界层方程的布拉休斯解	122
4-6	层流边界层方程的相似性解	136
4-7	绕楔形体流动的弗克纳-斯肯解	147
4-8	沿平壁面收缩型通道内流动边界层方程的解	161
*4-9	沿对称曲壁面流动边界层的级数解	165
4-10	非定常不可压缩的层流边界层	176
*4-11	二维曲面边界层局部相似性解简介	181
4-12	求解层流边界层方程的一种差分方法	183
第五章	二维层流边界层积分关系式解法	186
5-1	卡门边界层动量积分关系式	186
5-2	单参数速度剖面和相容的边界条件	190
5-3	曲面边界层动量积分关系式解法	193
5-4	平板和前驻点流动的边界层动量积分关系式解法	215
*5-5	边界层的动能积分关系式及其解法	225
第六章	轴对称与三维层流边界层	229
6-1	轴对称层流边界层方程	229
6-2	曼格勒变换	235
6-3	绕流圆锥体边界层的相似性解	240
6-4	轴对称边界层方程的级数解	244
6-5	轴对称边界层的动量积分关系式解法	250
6-6	一般三维不可压缩层流边界层方程	253
6-7	斜向绕流(偏航)无限长柱体的三维层流边界层	256
6-8	三维边界层的分离现象	265

第七章 湍流	270
7-1 基本概念	270
7-2 湍流运动的基本方程	279
7-3 湍流脉动量的测量和相关函数分析	300
7-4 湍流的半经验理论	309
7-5 湍流的发生	320
第八章 二维湍流边界层	323
8-1 湍流边界层的结构	333
8-2 二维湍流边界层方程	337
8-3 湍流边界层的速度分布	345
8-4 零压力梯度湍流边界层的计算	357
8-5 零压力梯度下的混合边界层	361
8-6 求解有压力梯度二维湍流边界层的积分方法	362
8-7 求解有压力梯度湍流边界层的微分方法	367
8-8 物体的阻力	378
8-9 边界层的控制	383
第九章 管内湍流	386
9-1 充分发展的管内湍流分层结构	386
9-2 管内湍流基本方程及其数学分析	393
9-3 管内半经验的速度分布律	397
9-4 管内湍流的摩擦阻力系数	405
第十章 自由射流与尾流	414
10-1 自由剪切流的基本概念	414
10-2 层流自由射流边界层方程的相似性解	416
10-3 湍流自由射流问题的分析	423
10-4 湍流自由射流边界层方程的解	426
10-5 湍流的尾流	432
10-6 湍流射流的一种积分方法	436
第十一章 可压缩粘性流体的流动	441

11-1	可压缩流体的库特流动	441
11-2	k/μ 是常数的解析解	443
11-3	雷诺比拟	445
11-4	二维可压缩层流边界层方程	448
11-5	可压缩层流边界层的相似性解	453
11-6	可压缩平板层流边界层	458
11-7	可压缩曲面层流边界层	461
11-8	二维可压缩湍流边界层方程	466
11-9	可压缩平板湍流边界层	470
第十二章	不可压缩流体的温度边界层	473
12-1	温度边界层的概念	473
12-2	温度边界层微分方程	475
12-3	温度边界层方程的准确解	478
12-4	温度边界层的积分关系式	483
12-5	温度边界层方程的近似解	485
12-6	湍流温度边界层	490
12-7	平板上的湍流传热	493
12-8	自然对流温度边界层	495
12-9	边界层内的摩擦热效应	501
12-10	空气动力加热	504
附录A	笛卡尔张量基础	508
附录B	常用正交坐标系中基本量和基本方程的表达式	526
附录C	一些流体的传输性质	540
参考文献		543

引 言

一、粘性流体流动的研究历史与发展简况

我们知道，空气和水是常见的有粘性的流体。远在古代，人们就已观察到固体在水及空气中运动时的相互作用，并加以利用。公元前约500年，我国《考工记》记载了箭的制作技术和箭头、箭尾、箭身配置不当时箭在空气中运动的现象。古希腊哲学家及科学家亚里斯多德(Aristotle, 公元前384~322)在他的著作《物理学》中阐述了空气对于炮弹的推动作用。这一观点并不正确，在第六世纪以后一直存在着争议。到十五世纪，意大利的列奥那多·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519)才最先认为运动着的物体头部受到空气对它的阻力。不过，他把阻力归因于空气的压缩性，仍是不合理的。随后，第一个直接研究流体摩擦力的也许是马里奥特(Edme Mariotte, 1620~1684)，他的贡献在于发明了用天平系统测量风洞的人工气流中静止模型的阻力。

著名科学家牛顿(Isaac Newton, 1642~1727)在他的《自然哲学的数学原理》(1687年出版)中，论述了抛射物体的阻力和钟摆的运动等问题。他把物体在流体中运动的阻力分成三部分。其中第一部分是常数项，第二部分是和摩擦有关的阻力，与速度的一次方成正比，第三部分和速度的二次方成正比（相当于现代的压差阻力）。牛顿在推导第二部分阻力时，给出了一个重要假设或称经典公式，即在流体两层间的摩擦力和这两层滑动的相对速度成正比。这代表一般粘性流体(如水和空气等)的特征，是粘性流体运动理论的最初基础。为了纪念牛顿，这类流体称为牛顿流体。

虽然牛顿提出关于粘性流体的重要假设，但粘性流动理论当

时没有得到应有的发展。牛顿名著《微积分》问世后，人们首先将微积分应用于解决无粘性的流体流动问题。

十八世纪，瑞士数学家伯努利 (Danil Bernoulli, 1700~1783) 发表了由他首次命名的《流体动力学》著作。书中确定了压力和速度之间的关系，即著名的伯努利定理。

欧拉 (Leonhard Euler, 1707~1783) 注意到伯努利工作的重要性，于1755年进一步导出了以欧拉命名的理想流体 (无粘流体) 的运动方程和连续性方程。从欧拉运动方程出发，形成了现在所谓经典的流体动力学或理想流体动力学。

依靠理想流体动力学所得到的理论分析结果常和实际情况不符。对于诸如管道压力降或物体在流体中运动阻力等问题来说，理想流体动力学所给予的答复为零。这对工程师来说没有什么意义。因此，工程师们相信大量的经验数据，以实验和量测作为解决问题的依据，构成了众所周知的水力学科学，而应用于当时的灌溉、河流的控制、水动力和供水等领域。这种局面一直延续到本世纪初为止。在水力学方面，伯努利、凯茨 (Chezy)、哈根 (Hagen)、达西 (Darcy)、韦斯巴赫 (Weisbach)、伯森 (Bazin)、雷诺 (Reynolds) 等人留下了有关粘性流体的出色的实验研究成果。

顺便提一下，我国古代利用铜壶滴漏实现了“漏刻计时”，并已注意到水温变化的影响。这种做法符合粘性流体在毛细管中流动的原理。

继欧拉等人之后所取得的显著进展，是在欧拉运动方程的基础上，考虑了由于粘性引起的摩擦力项。不可压缩流体的普遍运动方程组首先由法国工程师纳维 (Navier, 1785~1836) 导出，并于1822年发表。经过柯西 (Cauchy)、泊松 (Poisson)、维纳特 (St. Venant) 等人的分别研究，最后由斯托克斯 (Stokes, 1819~

1903)完成。他根据不同的假设,采用第一粘性系数 μ 导出了相应的方程,于1845年发表。后人又将方程加以发展,推广应用于可压缩流体。这些普遍的运动方程称为纳维-斯托克斯方程。这些方程使我们有可能对粘性流体的流动问题进行理论分析,但是方程的求解在数学上是困难的,而且通常是不稳定的,具有特解的例子并不多。最近,大型电子计算机的发展给该方程的数值解带来了希望。但是,在高雷诺数下,求得有用的并且有足够精度的解还存在着一定的问题,需要进一步探讨。

二十世纪初,德国物理学家普朗特(L. Prandtl, 1875~1953)于1904年阐明了粘性小的流体在沿物面流动中存在着薄的边界层,在此区域必须考虑流体的粘性影响,而边界层外可按无粘性流体处理,形成了粘性和无粘性匹配方法。在边界层外利用已经成熟的理想流体力学的计算结果,可使边界层内问题的数学处理大为简化,从而较易得到可资应用的解。普朗特提出的边界层理论为近代流体力学的发展铺平了道路。自本世纪三十年代至今,边界层理论得到了迅速发展和广泛应用,并在近期加快了前进的步伐。从不可压缩到可压缩、从层流到湍流、从二维到三维、从定常到非定常、从边界层方程的一阶近似到高阶近似以及对边界层分离的认识等都积累了许多经验或取得了相当成就。

值得指出的是,自从雷诺在1883年揭示了流体流动有两种形态——层流和湍流以来,鉴于湍流普遍存在于自然界和工程实际中,湍流理论一直是各国学者所关心的问题。湍流的半经验理论、湍流的数值计算和实验方法已取得显著的进展,对许多工程实际问题的解决起了较大的作用。不过从根本上说,完整系统的湍流理论还远未得到解决,有待于进一步研究。

二、课程的性质和任务

对粘性流体流动问题的研究已形成了粘性流体力学分支学

科,具有较强的理论性和系统性。从前面的介绍已可看出,粘性流体力学的用途是多种多样的,可进一步予以综述,诸如机翼等物体或微小的尘粒、雨滴等在流体中运动阻力的决定,物体适宜于采用何种形状以防止出现边界层分离和减少它在流体中运动的阻力的探讨,流体在各种通道中流动阻力的决定,不受壁面限制的射流与周围流体混合而形成的流场,以及射流的发展、射流流量变化的确定等都要依靠粘性流体力学来解决。固体壁面与流体之间的对流传热、射流与周围流体的传热、传质、燃烧化学反应等问题也需要以粘性流体力学作为一个重要的支柱。当然,粘性流体流动问题的解决不能离开实验和数值计算,它们也是粘性流体力学的一个重要组成部分。

本课程以求解二维粘性流体流动的阻力和流场为主,其任务在于使学生对粘性流体的运动以及流体和物体之间的相互作用所遵循的规律,具有较深入、系统和全面的认识,打下扎实的理论基础,获得相应的分析、计算和解决工程实际问题的能力。此外,还为传热学、燃烧学等其它工程热物理课程提供必要的基础理论知识。

第一章 粘性流体运动的基本概念

本章主要阐述粘性流体运动时的应力、变形率和二者间的关系以及传输性质等，为展开粘性流体力学问题的讨论提供必要的基础知识。

1-1 概 述

我们知道，流体是气体、液体的总称，其特征是在宏观的平衡状态下不能承受剪切力，也不能承受拉力。流体受到极小的剪切力就会连续变形，因而容易流动。

流体有理想流体和粘性流体之分。粘性流体在静止时不能承受剪切力，但在运动中发生变形时对于剪切力却表现出阻抗作用。自然界中存在的流体都是粘性流体，因而又称为实际流体或真实流体。理想流体^①完全忽略了流体的粘性作用，它是实际流体的近似模型。粘性所起的作用，对每一个具体的流动问题来讲不一定相同。例如，求解绕流物体的升力以及边界层外的流动问题时，理想流体的理论可以获得令人满意的结果。但对另一些问题，如求解绕流物体的阻力、涡旋的扩散以及热量的传递等问题时，理想流体模型所得到的结果与实际相差很大，甚至是谬误。“看作无粘性的理想流体流过物体的阻力为零”违反了粘性流体的实际情况。这一著名的达朗贝尔 (D'Alembert) 疑题就是突出的一例。因此，在粘性起主导作用的问题中，忽略粘性存在的理想流体流动理论就不能不被粘性流体力学理论所代替。所谓粘性流体力学，

① 工程热力学中的理想气体遵循克拉贝龙状态方程。这里的理想流体是指无粘性流体。在流体力学中常将前者称为完全气体。