



21世纪

高等学校精品规划教材

工程流体力学

主 编 杨小龙 孙 石

副主编 杨 辉 杨 春 高红斌





21世纪

高等学校精品规划教材

工程流体力学

主 编 杨小龙 孙 石

副主编 杨 辉 杨 春 高红斌



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是供工科大学使用的流体力学教材,系统地介绍了工程流体力学的基本知识、基本定理及其在工程上的应用,力求以简单、清晰但又不使用复杂数学公式的方式来讲述流体力学概念、基本理论和分析方法。其主要内容有流体及其物理性质、流体静力学、流体运动学基础、流体动力学基础、量纲分析与相似原理、不可压缩流体的理想流动、不可压缩粘性流体的内部流动、不可压缩粘性流体的外部流动、可压缩流体的流动、管路水力计算。每章均附有例题、小结和习题供选用。

本书可作为热能与动力工程、建筑环境与设备工程、水利水电工程、化学工程与工艺等专业本科生、研究生教材,也可作为各相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 杨小龙, 孙石主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 4
21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7444-1

I. ①工… II. ①杨… ②孙… III. ①工程力学: 流体力学—高等学校—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第074464号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 工程流体力学
作 者	主编 杨小龙 孙石 副主编 杨辉 杨春 高红斌
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383996 63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 17 印张 403 千字
版 次	2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	29.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

中国水利水电出版社教育出版分社于2008年制定了“21世纪高等学校精品规划教材”建设规划。本教材是该建设规划的系列教材之一,根据全国高校能源动力学科的教学计划和课程设置要求编写。

本教材以能源动力类专业的教学需要为主线,兼顾其他相近专业的教学需要。教材全书共10章,分为基础篇和应用篇两大部分。基础篇包括:流体及其物理性质,流体静力学,流体运动学基础,流体动力学基础,量纲分析与相似原理。应用篇包括:不可压缩流体的理想流动,不可压缩粘性流体的内部流动,不可压缩粘性流体的外部流动,可压缩流体的流动,管路水力计算。

流体力学是能源动力类专业一门十分重要的专业基础课,其基本理论多、概念抽象、公式繁多且推导复杂。本教材在编写上力图满足应用型本科专业的教学要求,内容的选取与组织上体现了理论与应用并重,突出了理论联系实际,强化了实践的应用,并加入了流体力学最新发展的一些介绍。为便于学生的学习和复习,每章都附有本章小结。每章习题均贴近书中内容。

本书由湖南大学杨小龙编写绪论、第1章、第5章;长春工程学院孙石编写第2章、第9章;山西大学高红斌编写第7章、第10章,杨春编写第4章、第8章及附录;中南林业科技大学杨辉编写第3章、第6章。杨小龙、孙石任主编。

限于作者水平,书中难免存在不足和错误之处,恳请读者和专家指正。

编者

2009年11月

符 号 表

A	面积	F_f	摩擦力
A_c	收缩断面面积	Fr	弗劳德数
dA	微元面积	σ	应力
a	加速度	$\vec{f}$	单位质量力
	椭圆长半轴	f	频率
	矩形长度	f_k	卡门涡脱体频率
b	宽度	f_x, f_y, f_z	单位质量力的坐标分量
	椭圆短半轴	$f(x, y, z)$	坐标的函数
	矩形宽度	g	重力加速度
c	声速	G	重力
	水击波传播速度	H	焓
	相似比例常数	H_1	形状因子
	比热容	H_0	滞止焓
C_D	绕流阻力系数	h	高度
C_e	入口段效应流量修正系数	h_f	沿程水头损失
C_f	摩擦阻力系数	h_w	单位重力流体能量损失
C_p	无因次压强系数	h_ζ	局部水头损失
c_p	比定压热容	I_x, I_{Cx}	惯性矩
c_v	比定容热容	I_{xy}	惯性积
c_α	临界声速	i	虚数
D	直径	J	旋涡强度
d	直径	K	体积模量
d_e	当量直径		动能
Eu	欧拉数	k	等熵指数
E	内能	L	长度
e	比内能	L_e	入口起始段长度
	单位重力流体的总机械能	l	长度
	偏心量		混合长度
F	力	m	质量
F_D	绕流阻力	M	偶极矩
F_b	浮力		作用力矩

Ma	马赫数	St	斯特劳哈尔数
M_{ac}	速度系数	T	温度
Ne	牛顿数	T_0	滞止温度
n	转数	T_{cr}	临界温度
	气体多变常数	t	时间
$\vec{n}$	单位法向矢量	t_0	水击波的波相
P	功率	u, v, w	相对运动速度分量
p_x, p_y, p_z	压强的坐标分量	U	力的势函数
p_a	大气压强	V	断面平均速度
p	压强		体积
p_e	计示压强、相对压强	V_{∞}	无穷远来流速度
p_0	滞止压强	V_{cr}	临界速度
p_v	汽化压强、真空度	v	流速
p_{xx}, p_{yy}, p_{zz}	法向压强力		比体积
p_{∞}	无穷远处压强	$V, \vec{v}$	流速矢量
p_{cr}	临界压强	$\bar{v}$	时间平均速度
$\bar{p}$	时间平均压强	v'	脉动速度
p'	脉动压强	v'_x, v'_y, v'_z	脉动速度的坐标分量
$\sigma'_{xx}, \sigma'_{yy}, \sigma'_{zz}$	附加法向应力	$\overline{v'}$	脉动速度的时均值
q	流量	v^*	剪切速度、切应力速度
q_m	质量流量	v_{∞}	无穷远来流速度
q_v	体积流量	v_x, v_y, v_z	速度的坐标分量
q_{cr}	临界流量	v_r, v_{θ}, v_z	柱坐标系的速度分量
dq	传输给气体的热量	$v_r, v_{\theta}, v_{\varphi}$	球坐标系的速度分量
R	气体状态常数	$W_{(z)}$	复位势函数
	内径	W_f	单位质量流体摩擦阻力做功
	水力半径	x, y, z	笛卡儿坐标分量
r, θ, z	柱坐标系坐标分量	X_D, Y_D	压力中心的坐标分量
r, θ, φ	球坐标系坐标分量	y_C	形心的坐标分量
R, θ, z	单位质量力的柱坐标分量	z	复数变量
R, θ, Φ	单位质量力的球坐标分量	α	角度
Re	雷诺数		体膨系数
Re_{cr}	下临界雷诺数		冲角
Re'_{cr}	上临界雷诺数		动能修正系数
r	半径	α_0	动量修正系数
	曲率半径	β	角度
S	距离		激波角
	单位质量流体的熵	γ	角变形速度

	比热比	ν	运动粘度
Γ	速度环量	π	圆周率
δ	边界层厚度	ρ	密度
	粘性底层厚度	ρ_0	滞止密度
	折转角	ρ_σ	临界密度
	微小量级	σ	应力
δ^*	位移厚度, 排挤厚度		表面张力系数
δ^{**}	动量损失厚度	Σ	和
Δ	绝对粗糙度	τ	切应力
ζ	局部损失系数	τ'	湍流附加切应力
ε	相对偏心率	φ	速度势函数
	压缩比		角度
	孔口断面收缩系数	ψ	流函数
ξ_e	附加压强损失系数	χ	湿周
η	效率	ω	角速度
θ	角度	$\vec{\omega}$	旋转角速度矢量
	射流极角, 射流扩散度	$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	角速度的坐标分量
λ	沿程损失系数	∞	无穷远, 无穷大
λ_p	压强损失系数	Δ	哈密尔顿算子
μ	马赫角	∇	拉普拉斯算子
	动力粘度	κ	压缩系数

目录

前言

符号表

绪论	1
0.1 流体力学研究的内容和方法	1
0.2 流体力学的发展简史	2
0.3 流体力学在现代科学中的应用	5
0.4 如何学好本课程	8

基 础 篇

第 1 章 流体及其物理性质	10
1.1 流体的定义和特征	10
1.2 流体的连续介质模型	11
1.3 流体的密度、比体积和相对密度	12
1.4 流体的压缩性和膨胀性	14
1.5 流体的粘性	16
1.6 表面张力和毛细现象	22
本章小结	24
习题	26
第 2 章 流体静力学	28
2.1 作用在流体上的力	28
2.2 流体平衡微分方程式	30
2.3 流体静力学基本方程式	33
2.4 液柱式测压计	36
2.5 流体在非惯性坐标系中的相对平衡	41
2.6 静止流体对壁面的压力	45
本章小结	51
习题	53

第 3 章 流体运动学基础	57
3.1 流场及其描述方法	57
3.2 流体运动的基本概念	59
3.3 粘性流体的流动形态	62
3.4 流体的流动状态	64
本章小结	66
习题	67
第 4 章 流体动力学基础	69
4.1 系统与控制体	69
4.2 输运公式	69
4.3 流体流动的连续性方程	71
4.4 理想流体的运动微分方程	74
4.5 理想流体微元流束的伯努利方程	75
4.6 伯努利 (Bernoulli) 方程的应用	77
4.7 动量方程	80
4.8 动量矩方程	84
4.9 实际流体的运动微分方程	86
本章小结	88
习题	89
第 5 章 量纲分析与相似原理	95
5.1 量纲分析	95
5.2 相似的概念	102
5.3 相似原理及相似准则数	104
5.4 近似模化实验	106
本章小结	109
习题	110

应 用 篇

第 6 章 不可压缩流体的理想流动	113
6.1 理想流体的有旋流动	113
6.2 速度势、流函数、流网	118
6.3 基本平面势流	121
6.4 基本平面势流的叠加	124
本章小结	129
习题	130
第 7 章 不可压缩粘性流体的内部流动	132
7.1 管内流动的能量损失	132

7.2	流动阻力	135
7.3	圆管内层流	137
7.4	平板间的层流	142
7.5	管内湍流	149
7.6	沿程阻力系数和局部阻力系数	156
	本章小结	165
	习题	167
第 8 章	不可压缩粘性流体的外部流动	170
8.1	边界层	170
8.2	边界层的动量积分方程	171
8.3	绕平板流动边界层的近似计算	173
8.4	绕曲面流动及边界层的分离	177
8.5	绕流阻力及升力	180
	本章小结	183
	习题	184
第 9 章	可压缩流体的流动	186
9.1	气体动力学基本方程组	186
9.2	音速与马赫数	188
9.3	微弱扰动波在空间流场中的传播	191
9.4	气体一维定常等熵流动	193
9.5	气流参数与通道面积的关系	203
9.6	膨胀波的形成及其特点	209
9.7	正冲波的形成及其前后气流参数的关系	211
9.8	斜冲波的形成及其前后气流参数的关系	217
	本章小结	220
	习题	223
第 10 章	管路水力计算	225
10.1	水力计算概述及简单管路	225
10.2	管路的串联与并联	228
10.3	管网	232
10.4	管路性能曲线	237
10.5	水击现象	240
	本章小结	242
	习题	243
附录 1	中英文人名对照表	248
附录 2	流体力学词汇 (部分) 英汉对照表	250
	参考文献	262

绪 论

0.1 流体力学研究的内容和方法

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律以及流体与周围物体之间相互作用的一门科学，是力学的一个重要分支。流体力学研究对象包括液体和气体，它们统称为流体。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体，大气和水是最常见的两种流体。大气包围着整个地球，地球表面的70%是水。大气运动（包括信风、季风、台风、龙卷风等）、海水运动（包括波浪、潮汐、表面洋流、深层环流等）乃至地球深处熔浆的流动都是流体力学的研究内容。

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，并解决流体和限制其流动的固体壁之间的相互作用问题。流体、运动和力（能量）是构成流体力学的三个基本要素。

流体力学基础理论一般可分为三部分：静力学、运动学、动力学。静力学主要研究流体处于静止或相对平衡状态下，各种作用在流体上的力之间的关系，是关于液体平衡的规律；运动学主要从几何学观点研究流体运动所遵循的规律，而不考虑流体受力和能量损失；动力学主要研究在流体运动时产生和施加在流体上的力和流体运动速度与加速度之间的关系。按对流体研究方法的不同，流体力学又可分为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学三种。理论流体力学主要采用严密的数学推理方法，力求准确性和严密性，寻求流体运动的普遍解；实验流体力学将实际流动问题概括为相似的实验模型，在实验中观察现象、测定数据并进而按照一定方法推测实际结果；计算流体力学是随着计算机发展而发展起来的一种方法，其基本原理则是利用各种数值方法编制计算机程序近似求解流体控制方程，获得空间和时间离散位置处的数值解，从而揭示流动的物理规律。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科，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、航天工程，还是化学工程、机械工程等都在日益广泛的应用着流体力学。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。不同工程技术领域的流体力学问题有各自不同的特点，概括起来主要有三种不同流动形式：一是有压管流，如流体在管道中的流动；二是绕流，如流体在流体机械中绕过翼型的流动；三是射流，如流体从孔口或管嘴喷出的流动。

一般的人们把侧重于工程应用的流体力学称为工程流体力学。从学科的角度来看，工程流体力学是介乎基础科学和工程技术之间的一门技术科学。一方面根据基础科学中的普遍规律，结合流体特点，建立理论基础，同时又紧密联系工程实践，发展学科内容。由于

在各种热能动力和许多机械设备中采用水、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功能和运行规律,才能正确地从事设计和运行管理。所以,工程流体力学是能源动力类和机械类各专业的主要专业基础课之一。

0.2 流体力学的发展简史

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斗争。流体力学同其他自然科学一样,也是人类为了满足自身生活和生产的需要,经过长期的生产实践和科学研究才逐渐发展成为自然科学的一个重要分支的。流体力学也有其独特的发展史,其发展既依赖于科学实验和生产实践,又受到许多社会因素的影响。纵观其历史,流体力学的发展可大致分为以下几个时期。

0.2.1 第一时期——萌芽时期,16世纪前

在人类与自然界长期斗争的历史中,流体力学也是长时间积累发展起来的。人们对流体力学的认识在相当长时间内处于一种萌芽状态,没有提升到理论高度,形成一门完整的学科。这一时期的流体力学发展主要是从捕猎、治水、灌溉、航行等方面开始的。比如在长期的打猎、捕鱼过程中,人们逐渐总结出了抛射的概念。我国是世界上四大文明古国之一,有着悠久的历史 and 灿烂的文化,由于生产发展的需要,我们的祖先在流体力学方面作出过突出的贡献。相传4000多年前的禹治水,就表明我国古代进行过大规模的防洪工作。在公元前256~前210年间我国劳动人民修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,还总结出“深淘滩,低作堰”的经验,说明了对流体流动规律的认识已达到相当高的水平。从公元前485年开始修建,直到隋朝才完成的长达1782km的京杭大运河,各段设置合理,并且使用了多处船闸,充分表明了我国劳动人民在建设水利工程方面的聪明才智。这些工程至今仍在农业生产和交通等方面起着重要的作用。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量为过水断面上平均流速乘以过水断面面积的计算方法。另外远在两千年以前,古代劳动人民就利用孔口出流的原理发明了刻漏、铜壶滴漏(西汉时期的计时工具),同时又发明了水磨、水碾等。在唐代以前,我国就出现了水轮翻车,宋元时代出现的水轮大纺车比英国早四五百年(英国在1796年发明)。航空方面,鲁班(公元前507—前444)与墨子就分别用竹木制成了能在空中飞翔的鹊和木鸢,这是最早的风筝和飞行器。3世纪,葛洪(284—363)制造“飞车”(竹蜻蜓),被世界公认是飞机螺旋桨的始祖。1161年,中国喷气推动的火箭和火箭式“霹雳炮”用于战争。这是世界航空史上最早使用火箭的记录。医学方面,早在公元前2世纪《黄帝内经》中就确立了人体血液循环理论。11世纪的沈括(1030—1095)结合漏壶中的渴乌(虹吸管)对细小圆管中的水流问题进行了研究,写出了价值颇高的《浮漏仪》一文。

在西方,公元前2000~前1000年埃及、巴比伦、罗马、希腊和印度等地的水利工程、造船和航海等事业也得到了蓬勃发展,如古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。据史载最早从事流体力学研究并使之成为学科的学者是古希腊哲学家阿基米德,他约在公元前250年撰写了《论浮体》一书,书中首次总结并提出了流体静力学的基本理论,奠定

了流体静力学的基础。然而,在这以后的一段较长的历史时期,由于奴隶制、神权和宗教观念的束缚,流体力学的发展进入了停滞时期,直到15世纪文艺复兴时期,没有关于流体力学发展的相关资料的记载。

0.2.2 第二时期——形成与发展时期,16世纪文艺复兴前后至18世纪中叶

15世纪末,随着欧洲资本主义的兴起,在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成近代的自然科学,流体力学也与其他学科一起,有了显著的进展。首先是著名的物理学家、艺术家列奥纳德·达·芬奇(1452—1519)在意大利米兰附近建造了世界上第一个小型水渠,通过实验描绘和讨论了许多水力现象,并正确地叙述了定常流动的连续性原理,从此,水利工程和流体力学问题的研究进入了一个新的时代。1686年,力学奠基人I·牛顿(1642—1727)于1687年出版了《自然哲学的数学原理》,提出了流体粘性的概念,通过实验建立了流体内摩擦力的确定方法——牛顿内摩擦定律,为建立粘性流体运动方程创造了条件。从此随着经典力学建立了速度、加速度、力等概念,以及质量、动量、能量三个守恒定律,流体力学尤其是流体动力学得到了较大发展。这一时期著名流体力学家还包括:1586年S·斯蒂芬(1548—1620)发表了《水静力学原理》;1612年G·伽利略(1564—1642),建立了关于物体沉浮的基本原理,使流体静力学得到了进一步的完善,同时,他也是第一个用实验的方法来研究力学的科学家;1643年E·托里拆利(1608—1647)论证了孔口出流的基本规律;1650年B·帕斯卡(1623—1662)建立了液体中压强传递的“帕斯卡原理”。

18~19世纪,流体力学得到了较大的发展,成为独立的一门学科。由于理论分析和实验研究两种方法的侧重点有所不同,从这个时期起,在流体流动问题的研究中出现了两个体系,古典(经典)流体力学沿着两条途径建立了流体运动的系统理论。一个是以牛顿力学理论和数学分析为基本方法,以严密的数学推论为主,侧重于从理论上处理问题,建立流体运动的系统理论,人们称为“理论流体力学”或“流体力学”;另一个则是根据实际工程的需要,以实践和实验研究为主,归纳实验结果建立实用的半经验公式,以解决实际工程问题,因这些研究主要以液体为对象,人们称之为“水力学(应用流体力学)”。这两个体系的代表人物分别为欧拉和伯努利。“理论流体力学”方面,1775年L·欧拉(1703—1783)提出了描述无粘性流体的运动方程——欧拉运动微分方程,他是理论流体力学的奠基人;拉格朗日(1736—1813)严格地论证了速度势的存在,并提出了流函数的概念;1883年雷诺(1842—1912)进行了雷诺实验,提出了雷诺数的概念;为湍流的理论研究奠定了基础;亥姆霍兹(1821—1894)提出了表征旋涡基本性质的旋涡定理;纳维和斯托克斯分别在1823年和1845年通过不同途径,建立了实际粘性流体运动方程组——纳维—斯托克斯(N—S)方程。“水力学”方面,1738年D·伯努利(1700—1782)对孔口出流和管道流动进行了大量的观察和测量研究,建立了理想流体的运动方程即伯努利方程;1769年A·谢齐(1718—1798)在总结各种渠道流动的基础上提出了明渠流动流速和流量计算的谢齐公式;1732年H·皮托(1695—1771)发明了用于流速测量的皮托管;1797年G·B·文丘里研制了用于流量测量的文丘里管。

由于这个时期解决流体流动问题中所用的理论依然有限,所以这个时期的理论大都是对自然现象在一些假设下的数学推理和实验的总结,这就难免会导致一些错误。1752年

达朗贝尔 (1717—1783) 在研究物体在流体中运动所受阻力时, 利用理想流体假设得出了物体运动阻力为零的结论, 但这个结论与实际流动是不相符的, 这个错误结论也因此而被称为“达朗贝尔佯谬”。

0.2.3 第三时期——完善时期, 19 世纪末至 20 世纪中叶

1904 年 L·普朗特 (1875—1953) 通过观测流体对固体边壁的绕流, 提出了划时代的边界层理论, 使粘性流体概念和无粘性流体概念协调起来, 使流体力学进入了一个新的历史阶段。这一理论既明确了理想流体的适用范围, 又考虑了物体运动时遇到的粘性阻力, 使上述两种情况得到了统一。

20 世纪初, 航空器的出现极大地促进了空气动力学的发展。1891 年 F·W·蓝彻斯特 (1868—1946) 提出绕流速度环量产生升力的概念, 为升力理论的建立创造了条件, 他也是第一个提出有限翼展理论的人; N·E·儒科夫斯基 (1847—1921) 等和 W·M·库塔 (1867—1944) 等研究了物体绕流和翼展理论, 分别在 1902 年和 1906 年独立地提出了库塔—儒可夫斯基定理和假定, 奠定了现代空气动力学的基础。机翼理论的正确性, 证明了无粘势流理论的正确性, 也间接证明了边界层理论。

同时, 这一时期量纲分析和相似原理在流体力学的发展中也起了举足轻重的作用。不断涌现的许多新兴工业领域提出了新的流体力学问题, 这就导致以纯理论分析为基础的流体力学和以实验研究为主的水力学已经不能适应技术发展的需要, 流体力学的研究方法开始向以理论分析和实验研究相结合为主的研究方法转变。L·瑞利 (1842—1919) 的量纲分析方法和雷诺的相似理论使理论分析与实验研究比较好地结合起来; 而 W·弗劳德 (1810—1879) 和雷诺等学者提出的一系列数学模型, 为相似理论在流体力学中的应用开辟了更为广阔的空间; 20 世纪 40 年代 J·尼古拉兹对各种人工光滑管和粗糙管的水力摩擦损失因素进行了系统、准确的实验研究和测量, 绘制了著名的尼古拉兹曲线图, 为管道的沿程损失计算提供了依据。

0.2.4 第四时期——飞跃发展时期, 20 世纪中叶至今

20 世纪六七十年代开始, 特别是进入 21 世纪后, 深空探测以及各种科学技术的迅速发展, 对流体力学提出了新的要求, 流体力学的学者们除了对湍流、涡流动力学、流动稳定性与过渡和非定常流动等理论问题继续进行研究外, 更主要的是转而研究石油、化工、冶金、能源、环保、生物等领域中的流体力学问题, 上述这些研究都取得了丰硕的成果, 既促进了生产技术的发展, 又大大丰富了流体力学的学科内容。如 20 世纪 40 年代以后, 由于喷气推进和火箭技术的应用, 飞行器速度超过声速, 进而实现了航天飞行, 使气体高速流动的研究进展迅速, 形成了气体动力学、物理—化学流体动力学等分支学科。而为了研究原子弹、炸药等起爆后, 激波在空气或水中的传播, 则发展了爆炸波理论。

流体力学这些巨大进展是和采用各种数学分析方法和建立大型、精密的实验设备及仪器等研究手段分不开的。自 1947 年第一台电子计算机问世后, 数值计算技术得到了飞速发展, 有限差分法、有限元法、边界元法、有限体积法等计算方法相继派生出来, 并且在求解流体力学的问题中得到了广泛的应用, 流体力学中的数值计算已经成为继理论分析和实验研究之后的第三种重要的研究方法, 是目前求解各种复杂的流体流动问题的重要工具。而且可以预见, 随着计算机的计算速度和容量的提高, 以及计算方法的不断进步, 数

值计算在复杂的流体力学问题的求解中将发挥愈来愈重要的作用。

13 世纪以前,我国在流体力学理论及应用方面作出了巨大贡献,曾领先于世界。1949 年新中国建立以后,与其他自然学科一样,流体力学得到迅猛发展,建造了众多的各级重点实验室,不仅解决了无数的生产实际问题,而且还培养了一支具有较高水平的理论和实验队伍。我国科学家的杰出代表钱学森早在 1938 年发表的论文中,便提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门—钱学森解法,他在空气动力学、航空工程、喷气推进、工程控制论等技术科学领域作出过许多开创性的贡献。吴仲华在 1952 年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》和在 1975 年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机械三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机械三元流理论,至今仍是国内外许多优良叶轮机械设计计算的主要依据。周培源多年从事湍流统计理论的研究,取得了不少成果,1975 年发表在《中国科学》上的《均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论》便是其中之一。郭永怀在跨声速领域的理论研究方面作出了杰出贡献,同时他还发展了奇异摄动理论中的变形坐标法,即国际上公认的 PLK 方法。

0.3 流体力学在现代科学中的应用

科学技术的高速发展,以及科学技术和工业生产的日趋复杂,使现代流体力学的研究内容有了明显的变化,出现了与相关的邻近学科相互渗透,形成了许多新分支或交叉学科,如计算流体力学、电磁流体力学、生物流体力学、多相流体力学、非牛顿流体力学、流变流体力学、高速气体动力学、稀薄气体动力学、环境流体力学、物理—化学流体力学、流体机械流体力学等。流体力学的发展趋向于渗入更为广泛的领域,已成为宇宙航行、海洋学、气象学、现代医学、能源、化工、水利水电、流体机械等许多科学技术的重要组成部分。

0.3.1 电磁流体力学

电磁流体力学是流体力学和电动力学的交叉学科,主要研究电场作用下液体电解质的运动特性(图 0.1)。导电流体在电磁场里运动时,流体中就会产生电流。此电流与磁场相互作用,产生洛伦兹力,从而改变流体的运动,同时此电流又导致电磁场的改变。对这类问题进行理论探讨,必须既考虑其流体力学效应,又考虑其电磁效应。

导电流体包括等离子体和液态金属等。前者包括 99% 以上的宇宙物质,后者包括核动力装置中的携热介质(如钠、钾、钠钾合金)、化学工业中的置换剂(如钠、钾、汞)、冶金铸造工业中的熔融金属等。地球表面一般不存在自然等离子体,但可因核辐射、气体放电、燃烧、电磁激波、激光等方法产生人工等离子体。因此,磁流体力学不仅与等离子体物理学有联系,

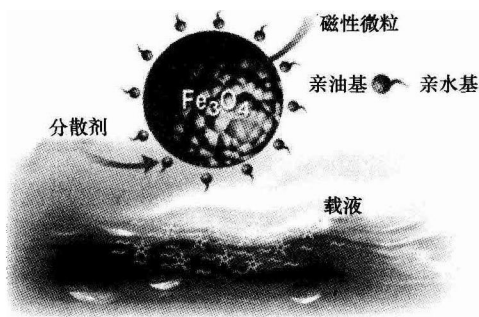


图 0.1 磁流体

还在天体物理研究（如磁场对日冕、黑子、耀斑的影响）、受控热核聚变和工业新技术（如电磁泵、电弧加热器、磁流体发电、电磁输送、电磁推进等）中得到发展和应用。因此，磁流体力学同物理学的许多分支以及核能、化学、冶金、航天等技术科学都有联系。

0.3.2 多相流体力学与物理化学流体力学

物理化学流体力学是研究同扩散、渗析、返泓、电泳、聚并、燃烧、流态化和毛细流等物理化学现象有关的流体力学分支，其中多为多相流。多相流体力学研究同种或异种化学成分物质的固—气、液—气、固—液或固—液—气系统共同流动规律的学科。图 0.2 为几种常见管内气固两相流流型。

多相流体力学研究的根本出发点是建立多相流模型和基本方程组。在此基础上分析各相的压强、速度、温度、表观密度和体积分数、气泡或颗粒尺寸分布、相间相互作用（如气泡或颗粒的阻力与传热传质）、颗粒湍流扩散、流型、压力降（两相流通过管道时引起的压差）、截面含气率、流动稳定性、流动的临界态等，以便弄清其中的动量传递、传热、传质、化学反应等。

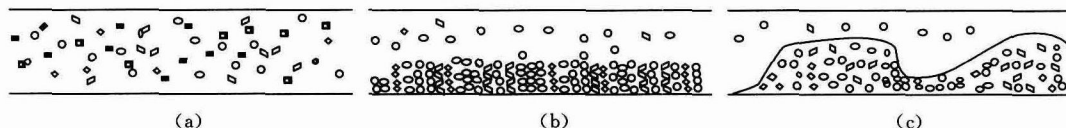


图 0.2 几种常见管内气固两相流流型

(a) 均匀流；(b) 颗粒流；(c) 沉淀流

多相流动广泛存在于自然界和工程设备中，如含尘埃的大气和云雾、含沙水流、各种喷雾冷却、粉末喷涂、血管流、含固体粉末的火箭尾气、炮膛内火药颗粒及其燃烧产物的流动等。因此多相流体力学广泛应用于冶炼、石油、塑料、化纤、彩胶、橡胶和造纸工业等，包括粉粒物料的管道输送、颗粒分离和除尘、液雾和煤粉悬浮体的燃烧和气化、流化床和流化床燃烧以及锅炉、反应堆、化工、冶炼和采油等装置中的气—液流动等方面。

0.3.3 环境流体力学

风对建筑物、桥梁、电缆等的作用使它们承受载荷和激发振动；废气和废水的排放造成环境污染；河床冲刷迁移和海岸遭受侵蚀；泥石流和熔岩流的爆发对环境造成破坏性影响，研究这些流体本身的运动及其同人类、动植物间的相互作用的学科称为环境流体力学。环境流体力学是流体力学在近代应用方面的一个重要分支，涉及到经典流体力学、气象学、海洋学、结构动力学、地质学等多个学科的新兴边缘学科。在短短的几十年内，环境流体力学得到了飞速发展，已由简单的污水处理和空气处理发展到包括环境水动力学、土壤污染力学、大气和沙尘暴力学、环境岩土和地质灾害力学等多个方面。

环境流体力学的主要任务是应用流体力学的原理，深入研究各种污染物质在不同地理和气象条件下，在大气和水体以及土壤中的稀释、扩散、迁移、分布和转化规律，利用多学科知识建立污染物质的模型方程，为预测、预报和治理环境污染提供科学依据。环境流体力学研究较多的是大气污染与水体污染，如图 0.3 所示。公认的大气污染现象有汽车尾气、光化学烟雾、酸雨、温室效应及臭氧，它们大都来自化工、动力、交通和建设等。而

水体环境污染主要污染源有工业废水、生活污水、农业污水等。这些污染物在水面或水中漂移、扩散、沉积,有时还会与其他物质发生物理和化学反应。

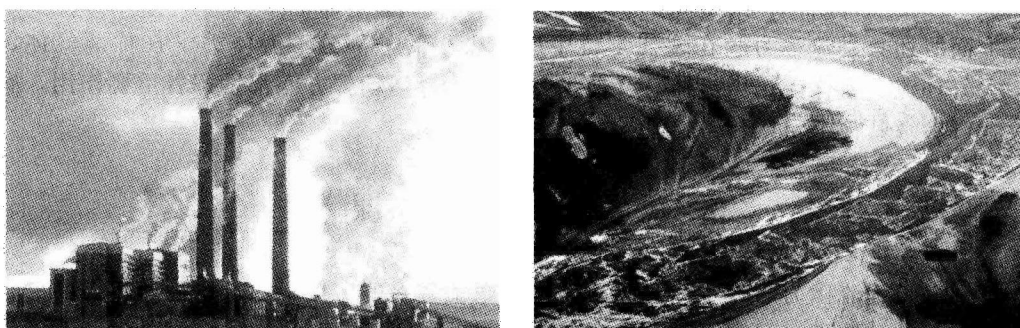


图 0.3 大气污染与水污染

0.3.4 生物流体力学

生物流体力学是生物力学的一个分支,主要研究动物和人体内生理流体流动(如血液、气体、尿液、淋巴液和其他体液等)、植物生理流动、动物运动(如飞行和游泳)中的流体力学问题、人工脏器中的流体力学问题以及生物技术(如生物反应器)中的流体力学问题等(图 0.4)。生物流体力学是把水动力学、空气动力学、边界层理论和流变学等流体力学知识和生物心血管系统、消化呼吸系统、泌尿系统、内分泌以及游泳、飞行等问题有机结合起来的一门交叉学科。

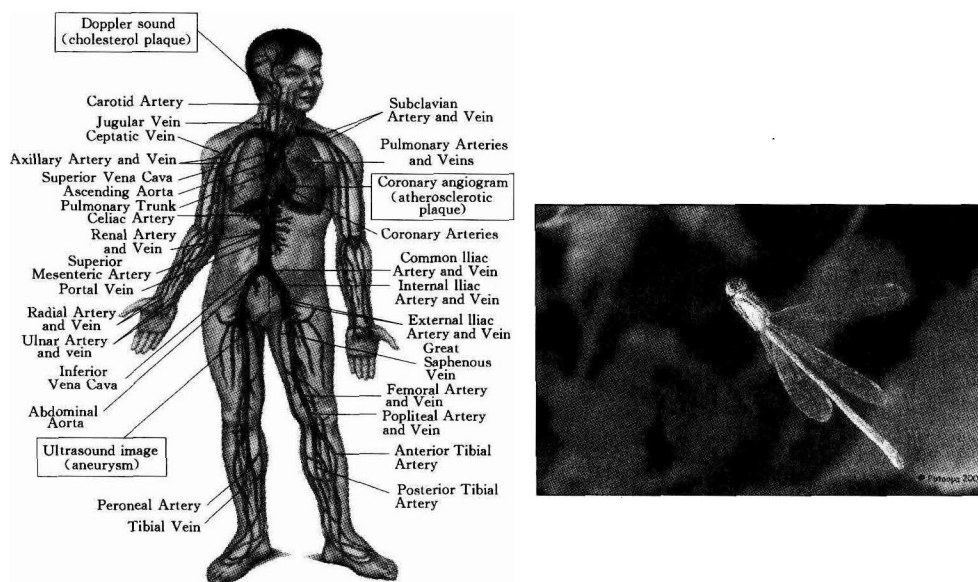


图 0.4 生物流体

生物的流体力学问题复杂而多样,既有流体的固有性质,即粘滞性规律复杂多样,有牛顿流体,又有非牛顿流体;又有复杂的管道系统,其中有固定的、弹性的和粘弹性的管