



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 流体力学

上册

丁祖荣 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

111



第 111 卷第 1 期 2013 年 1 月

# 流体力学

上册

111 卷 1 期



中国力学学会 中国流体力学学会 中国空气动力学学会 中国宇航学会 中国工程热物理学会 中国能源研究会 中国核能学会 中国核学会 中国核子物理学会 中国核子物理学会 中国核子物理学会

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 流体力学

上册

丁祖荣 编著

高等教育出版社

## 内容简介

本教材是普通高等教育“十五”国家级规划教材,分上、中、下三册,内容包括绪论篇、基础篇、专题篇、应用与进展篇,共15章。绪论篇综述流体力学在推动社会和科技发展中的重要作用;基础篇围绕流体力学三大要素(流体、运动和力),介绍各专业共同必须具备的力学概念、观点、基本理论和分析方法;专题篇介绍运用基本理论与方法对五个专题不同类型流动问题的分析和求解过程,及有代表性的结果;应用与进展篇介绍流体力学在三个工程领域中的应用,及在计算流体力学和流体测量技术等领域的进展。

本书为上册(绪论篇和基础篇)。内容包括:绪论、流体及其物理性质、流动分析基础、微分形式的基本方程、积分形式的基本方程、量纲分析与相似原理。

本教材可作为高等学校热能与动力工程、核技术与核工程、暖气与通风工程、机械工程等专业本科生的教材,也可供土木工程、化学工程、环境工程、水利工程等专业本科生和有关工程技术人员参考。

本教材配有《流体力学电子教案》和《流体力学网络课程》。

## 图书在版编目(CIP)数据

流体力学. 上册 / 丁祖荣编著. —北京:高等教育出版社,2003.12

ISBN 7-04-011855-6

I. 流... II. 丁... 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(2003)第 067425 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2003年12月第1版
印 张	14.25	印 次	2003年12月第1次印刷
字 数	250 000	定 价	17.10元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 序 言

本教材为准备学习流体力学基础知识的工程专业本科生编写。对这类学生来说,他们需要跨越一条存在于专业需要和自身知识结构之间的沟壑。几乎所有的工程专业直接或间接都与流体力学有关系,随着科技的发展和计算机软件的普及,各类工程专业对流体力学知识的需求日趋增长。另一方面,大多数学生对流体运动的感性认识明显的比对固体运动贫乏。本教材的宗旨是帮助这些学生顺利跨越这道沟壑,使其正确掌握能面向新世纪要求的流体力学知识。

在世纪之交,流体力学教学面临来自两方面的挑战:一是流体力学学科进入了一个新的发展时期。主要表现在流体力学的分析手段更为先进,处理流动问题的能力更为强大,对流体运动的认识更加深刻;流体力学与工程技术的结合不再局限于两个专业之间的简单合作,而是进入了相互融合的阶段;流体力学与其他学科领域的交叉渗透进一步深入和扩大等。为了适应这些变化,要求教材的体系和内容必须作相应调整和更新。二是教学课时压缩。在保证基本内容和适当增加扩展内容的前提下,要求教材在内容编排上更加科学合理,叙述精练准确,有利于学生自主学习,并加强多种媒体形式的辅助教学等。根据以上要求,本书在以下几方面作了探索:

(1) 改变传统模式,建立新的内容体系。将本教材分为绪论篇、基础篇、专题篇和应用与进展篇四部分,约 200 个知识点。绪论篇综述了流体力学在推动社会和科技发展中所起的重要作用;基础篇围绕流体力学三大要素(流体、运动和力)介绍各专业共同必须具备的基本概念、观点、理论和方法;专题篇介绍运用基本理论和方法对五个不同类型流动问题的分析求解过程和有代表性的结果,供不同专业选用;应用与进展篇介绍流体力学在三个工程领域中的应用,及在计算流体力学和测量技术等领域中的进展。

(2) 改变传统结构,建立枝状开放式结构。将本教材分为四个层次,各层次均具有相对独立性和可扩展性。如在 B 篇下,B1 相当于章,B1.1 相当于节,B1.1.1 为知识点。例题以知识点名标号排序(第一道与知识点同名,第二道起分别加 A,B,C 等);习题以节名标号排序。补充新的例题或习题均不打乱其他知识点或节中例题或习题的排序。

(3) 注重物理阐述,引导学生建立正确的物理概念和力学模型。这一点对

工科学生应用流体力学知识解决本专业问题,及学习与运用流体力学计算软件时尤为重要。考虑到工科专业的特点,简化公式的推导过程,强调知识点的工程背景、分析的思路、结果的物理意义和如何运用等;对一些概念提出新的解释或表述,并充分运用图片、图表及多媒体手段介绍丰富的流动现象、流动模型,帮助学生理解各种概念和公式的物理本质。

(4) 注重研究方法的介绍和归纳。为适应现代计算机数值计算的发展和应  
用,在基础篇中加强了微分分析的内容,引入速度场、加速度场、压强场等概念;  
一开始就以  $N-S$  方程作为支配方程,专题篇各章中的运动方程均作为  $N-S$  方  
程的简化情况直接导出;并在应用与进展篇中设章介绍计算流体力学的基础知  
识。设章集中介绍积分方法(控制体法),并加强了相似理论(模型实验)的内容。  
这两部分都是常用的工程研究方法。在专题篇中按内流和外流分别设章,每一  
类包含多种流动形式,有利于掌握它们的共性。

(5) 注重培养学生的应用和创新能力。注意介绍在流体力学发展过程中的  
应用和创新事例;在基础篇和专题篇中通过例题介绍流体力学的各种应用;在应  
用与进展篇中较为系统地介绍流体力学在三个工程领域中的应用,并介绍流体力  
学的新进展及与其他学科的交叉渗透,培养学生的创新和拓展意识。

(6) 有利于学生自主学习。例题具有典型性、实用性和前后连贯性,每道例  
题标有反映相关知识点内容的标题,以便于检索;习题按节标号排序,以利于学  
生自主选择;本书还配有网络版,供学生自主学习。

(7) 关于沿用“无量纲量”的说明。如何称呼所有量纲指数都等于零的量,  
至今仍是  
个有争议的问题。国标 GB3101—93 指出“所有量纲指数都等于零的  
量往往称为无量纲量”,也称为“量纲为一的量”。本文采用“无量纲量”的提  
法。

本书的主要使用对象是非力学类工程专业的本科生,如动力、能源、暖通、  
机械及相关专业的本科生。多学时课程以前三篇内容为主,应用与进展篇内  
容可选讲或作为学生自学用;少学时课程则只讲基础篇,及选专题篇部分章  
节。

华中科技大学的莫乃榕教授担任本教材的主审,提出了许多有价值的意见  
和建议;上海交通大学流体力学教研室的资深教授朱世权、孙祥海、郑国桦、吴君  
朋等分别审阅了部分章节,提出过许多宝贵的意见和建议;上海交通大学机械动  
力学院杜朝辉教授提供了宝贵资料,在此表示衷心感谢。高级工程师于乃华承  
担了几乎全部书稿的打印工作,研究生张可丰承担全部书稿的编辑排版和部分  
绘图工作,陈平汉、谢其军参加部分绘图工作,张景新(博士生)和王勇协助例题  
和习题的校对工作等,在此也一并致谢。最后要感谢家人对作者的支持和鼓励。

作者试图为读者提供一本讲解简练、内容较为丰富的流体力学基础教材,限

于作者水平,再加上时间仓促,书中必存在不当和谬误之处,恳请专家与读者不吝指正,帮助作者及时修正。

作 者

2003年7月于上海交通大学

# 主要符号表

## 1. 拉丁字母

$A$	面积
$a$	加速度;半径
$B$	任意物理量
$B^*$	无量纲量,临界值
$\bar{B}$	时均值
$b$	宽度,厚度
$C$	常数,系数,谢齐系数;形心,浮心
$C_f$	摩擦系数
$C_p$	压强系数
$C_D$	阻力系数
$CS$	控制面
$CV$	控制体
$c$	声速;比热容;翼弦
$c_v$	比定容热容
$c_p$	比定压热容
$D$	直径;压强中心
$d$	直径
$d_h$	水力直径
$E$	弹性模量;能量
$e$	单位质量流体的内能(比内能);压强中心纵向偏心距
$e_s$	单位质量流体的储存能
$e_r, e_\theta, e_z$	柱坐标系三个正交单位矢量
$F$	力
$F_b$	体积力,浮力
$F_s$	表面力



$F_D$	阻力
$F_L$	升力
$f$	单位质量流体的体积力;压强中心横向偏心距
$f_g$	单位质量流体的重力
$G$	比压降;切变模量;重心
$g$	重力加速度
$H$	高度,深度;总水头
$h$	高度,淹深;水头;比焓
$h_L$	水头损失
$h_f$	沿程损失
$h_m$	局部损失
$h_0$	总比焓
$I$	面积二次矩(惯性矩)
$i$	虚数单位
$i, j, k$	直角坐标系三个正交单位矢量;
$J$	水力坡度
$K$	体积模量;局部损失因子
$k$	热传导系数;比例系数
$L$	长度量纲
$L$	长度;动量矩
$l$	长度,混合长度
$M$	质量量纲
$M$	力矩;偶极矩;浮体稳心
$Ma$	马赫数
$m$	质量
$m$	质量流量
$N_s$	比转数
$N_{sys}$	系统广延量
$n$	平面法向单位;转速;曼宁粗糙系数
$P$	压强函数;应力张量;湿周
$p$	压强,表面应力;动量
$p_{ab}$	绝对压强
$p_g$	表压强
$p_v$	真空压强

$p_{\text{atm}}$	大气压强
$p_{\infty}$	无穷远压强
$p_b$	背景压强
$Q$	体积流量;热量
$\dot{Q}$	传热速度
$q$	单位质量流体的热量
$R$	半径;气体常数
$r$	半径
$r_{\xi}$	回转半径
$r_h$	水力半径
$SG$	比重
$s$	单位质量流体的焓(比焓)
$T$	时间量纲
$T$	周期;温度;转矩
$T_s$	轴矩
$t$	时间
$U$	均流速度,牵连速度
$u v w$	直角坐标系速度分量
$u_m$	轴线速度,最大速度
$u', v'$	速度脉动值
$u_*$	壁面摩擦速度
$V$	平均速度
$V_r$	相对速度
$V_{\infty}$	无穷远速度
$v$	速度;比容
$v_r, v_{\theta}, v_z$	柱坐标系速度分量
$W$	功;重量
$\dot{W}$	功率
$\dot{W}_s$	轴功率
$\dot{w}$	单位质量流体所作功率

## 2. 希腊字母

$\alpha$	角度,马赫角;动能修正因子
$\beta$	角度;温度系数;动量修正因子

$\Gamma$	速度环量
$\gamma$	角度;比热比
$\dot{\gamma}$	角变形率
$\delta$	角度;边界层厚度
$\delta^*$	边界层位移厚度
$\epsilon$	线应变率;粗糙度;收缩比
$\eta$	分布函数;效率
$\Theta$	温度量纲
$\theta$	角度;边界层动量厚度
$\lambda$	达西摩擦因子;波长
$\mu$	[动力]粘度
$\nu$	运动粘度
$\xi \eta \zeta$	辅助坐标系三个坐标量
$\Pi$	相似准则数
$\pi$	力势函数
$\rho$	密度
$\sigma$	附加法向应力;表面张力;空泡数
$\tau$	切应力;体积
$\tau_w$	壁面切应力
$\tau_p$	压力体
$\Phi$	耗散函数;速度势函数
$\Psi$	流函数
$\Omega$	涡量
$\omega$	角速度,角频率

### 3. 其他

$\nabla$	哈密顿算子
$\nabla^2$	拉普拉斯算子
$\frac{D}{Dt}$	随体导数欧拉算子
dim	量纲符号

# 上册目录

## A 绪论篇

<b>A1 绪论</b> .....	2
<b>A1.1 流体运动与流体力学</b> .....	2
A1.1.1 有关流体运动的三个问题 .....	2
A1.1.2 流体力学的任务 .....	3
<b>A1.2 流体力学与科学</b> .....	4
<b>A1.3 流体力学与工程技术</b> .....	5
<b>A1.4 流体力学研究方法</b> .....	6
A1.4.1 理论分析方法 .....	6
A1.4.2 实验方法 .....	6
A1.4.3 数值方法 .....	7
<b>A1.5 单位制</b> .....	7

## B 基础篇

<b>B1 流体及其物理性质</b> .....	10
<b>B1.1 连续介质假设</b> .....	10
B1.1.1 流体的宏观特性 .....	10
B1.1.2 流体质点概念 .....	11
B1.1.3 连续介质假设 .....	11
<b>B1.2 流体的易变形性</b> .....	12
<b>B1.3 流体的粘性</b> .....	14
B1.3.1 流体粘性的表现 .....	14
B1.3.2 牛顿粘性定律 .....	16
B1.3.3 粘度 .....	19
<b>B1.4 流体的其他物理性质</b> .....	22

B1.4.1 流体的可压缩性 .....	22
B1.4.2 表面张力 .....	24
<b>B1.5 流体模型分类</b> .....	28
B1.5.1 无粘性流体与粘性流体 .....	28
B1.5.2 可压缩流体与不可压缩流体 .....	29
B1.5.3 其他流体类型 .....	30
<b>习题</b> .....	31
<b>B2 流动分析基础</b> .....	33
<b>B2.1 描述流体运动的两种方法</b> .....	33
B2.1.1 拉格朗日法 .....	33
B2.1.2 欧拉法 .....	34
<b>B2.2 速度场</b> .....	36
B2.2.1 流量与平均速度 .....	36
B2.2.2 一维、二维与三维流动 .....	39
B2.2.3 定常流动与不定常流动 .....	42
<b>B2.3 流体运动的几何描述</b> .....	44
B2.3.1 迹线 .....	44
B2.3.2 流线 .....	45
B2.3.3 脉线 .....	48
B2.3.4 流体线 .....	50
B2.3.5 流管、流束与总流 .....	51
<b>B2.4 流体质点的随体导数</b> .....	51
B2.4.1 加速度场 .....	52
B2.4.2 质点导数 .....	54
<b>B2.5 一点邻域内相对运动分析</b> .....	57
B2.5.1 亥姆霍兹速度分解定理 .....	57
B2.5.2 流体的变形 .....	58
B2.5.3 流体的旋转 .....	63
<b>B2.6 几种流动分类</b> .....	66
B2.6.1 层流与湍流 .....	66
B2.6.2 内流与外流 .....	69
B2.6.3 无旋流动与有旋流动 .....	71
<b>B2.7 常用的流动分析方法</b> .....	73
B2.7.1 基本的物理定律 .....	73

B2.7.2 系统与控制体分析法 .....	73
B2.7.3 微分与积分方法 .....	75
B2.7.4 量纲分析法 .....	75
习题 .....	76
<b>B3 微分形式的基本方程 .....</b>	<b>79</b>
<b>B3.1 微分形式的质量守恒方程 .....</b>	<b>79</b>
B3.1.1 流体运动的连续性原理 .....	79
B3.1.2 微分形式的连续性方程 .....	80
<b>B3.2 作用在流体元上的力 .....</b>	<b>83</b>
B3.2.1 体积力与表面力 .....	83
B3.2.2 重力场 .....	85
B3.2.3 流体应力场 .....	86
<b>B3.3 微分形式的动量方程 .....</b>	<b>90</b>
<b>B3.4 纳维 - 斯托克斯方程 .....</b>	<b>91</b>
<b>B3.5 边界条件与初始条件 .....</b>	<b>93</b>
<b>B3.6 压强场 .....</b>	<b>96</b>
B3.6.1 静止重力流体中的压强分布 .....	96
B3.6.2 压强计示方式与单位 .....	98
B3.6.3 运动流体中的压强分布 .....	101
B3.6.4 空化与空蚀 .....	105
习题 .....	108
<b>B4 积分形式的基本方程 .....</b>	<b>111</b>
<b>B4.1 流体系统的随体导数 .....</b>	<b>111</b>
B4.1.1 控制体的选择 .....	114
<b>B4.2 积分形式的连续性方程 .....</b>	<b>115</b>
B4.2.1 固定的控制体 .....	115
B4.2.2 运动的控制体 .....	120
<b>B4.3 伯努利方程及其应用 .....</b>	<b>121</b>
B4.3.1 沿流线的伯努利方程 .....	121
B4.3.2 沿总流的伯努利方程 .....	126
B4.3.3 伯努利方程的水力学意义 .....	130
B4.3.4 不定常流伯努利方程 .....	132
<b>B4.4 积分形式的动量方程及其应用 .....</b>	<b>133</b>

B4.4.1 固定的控制体 .....	133
B4.4.2 匀速运动的控制体 .....	142
<b>B4.5 积分形式的动量矩方程 .....</b>	<b>143</b>
B4.5.1 固定的控制体 .....	144
B4.5.2 旋转的控制体 .....	148
<b>B4.6 积分形式的能量方程 .....</b>	<b>150</b>
B4.6.1 固定的控制体 .....	151
B4.6.2 能量方程与伯努利方程比较 .....	153
<b>习题 .....</b>	<b>156</b>
<b>B5 量纲分析与相似原理 .....</b>	<b>163</b>
<b>B5.1 量纲与物理方程的量纲齐次性 .....</b>	<b>163</b>
<b>B5.2 量纲分析与 <math>\Pi</math> 定理 .....</b>	<b>166</b>
B5.2.1 $\Pi$ 定理 .....	166
B5.2.2 量纲分析法 .....	167
<b>B5.3 流动相似与相似准则 .....</b>	<b>171</b>
B5.3.1 流动相似 .....	171
B5.3.2 相似准则 .....	172
<b>B5.4 相似准则数的确定 .....</b>	<b>173</b>
<b>B5.5 常用的相似准则数 .....</b>	<b>176</b>
<b>B5.6 模型实验与相似原理 .....</b>	<b>179</b>
B5.6.1 模型实验 .....	179
B5.6.2 相似原理 .....	180
B5.6.3 关于相似原理的讨论 .....	182
<b>习题 .....</b>	<b>183</b>
<b>附录 A 常用流体的物理性质 .....</b>	<b>187</b>
<b>附录 B 单位换算表 .....</b>	<b>190</b>
<b>附录 C 有关数学公式 .....</b>	<b>193</b>
<b>主要参考文献 .....</b>	<b>195</b>
<b>习题答案 .....</b>	<b>197</b>

<b>索引</b> .....	200
<b>例题索引</b> .....	204
<b>Synopsis</b> .....	206
<b>Contents</b> .....	207
<b>作者简介</b> .....	209





---

# 绪 论 篇