

高等学校教材

# 流体力学 (第3版)

下 册

丁祖荣



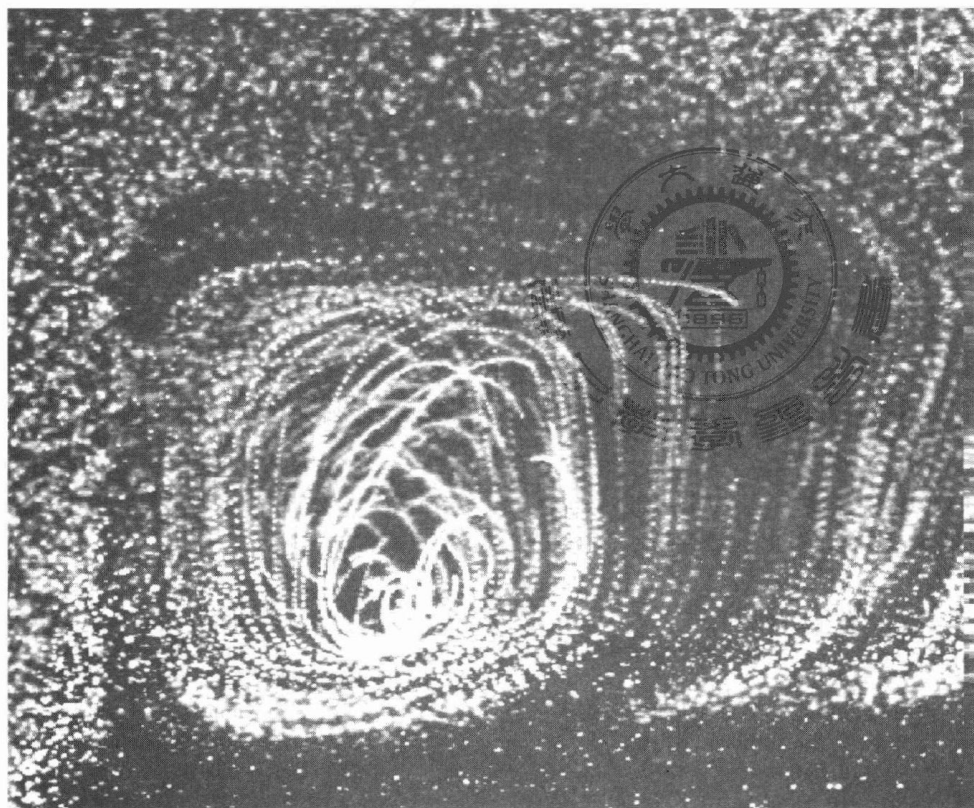
高等教育出版社

高等学校教材

# 流体力学 (第3版)

下册

丁祖荣



高等教育出版社·北京

## 内容简介

本教材第1版(2003年)被列为普通高等教育“十五”国家级规划教材,并于2007年获上海市优秀教材一等奖。本版是在第2版(2013年)的基础上为适应新形势的要求修订而成的。本次修订保持了前版的内容体系和结构,坚持强调物理概念、注重历史、讲解精练等风格,在总结自身教学经验的基础上,参考教材使用单位所反馈的信息,增补了新的内容。全书分为上、下两册。

上册为绪论篇,以及基础篇: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。附录包括常用流体的物理性质、单位换算表和有关数学公式。

下册包括专题篇:流体的平衡、不可压缩无黏性流体平面势流、不可压缩黏性流体内流、不可压缩黏性流体外流、可压缩流体流动基础,其中部分内容是其他教材未见的。附录包括计算流体力学简介、有关几何图形与公式、平板边界层数据、物体阻力系数和气动函数数据。

本教材可作为高等学校动力工程、热能工程、核工程、工程力学等专业的本科生教材,也可作为其他相关专业本科生教材或参考书,并可供工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

流体力学.下册/丁祖荣编著.--3版.--北京:  
高等教育出版社,2018.7(2019.11重印)

ISBN 978-7-04-049920-9

I. ①流… II. ①丁… III. ①流体力学-高等学校-  
教材 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第120296号

策划编辑 赵向东      责任编辑 赵向东      封面设计 李小璐      版式设计 徐艳妮  
插图绘制 于博      责任校对 刘娟娟      责任印制 韩刚

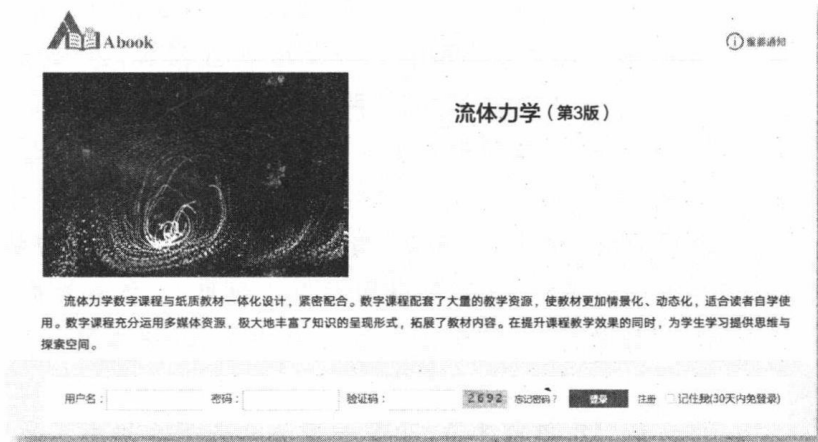
出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街4号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	北京印刷集团有限责任公司		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787mm×960mm 1/16		<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张	18.75	版 次	2003年12月第1版
字 数	310千字		2018年7月第3版
购书热线	010-58581118	印 次	2019年11月第2次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	35.60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  
物料号 49920-00

# 流体力学

(第3版)

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1245073>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



<http://abook.hep.com.cn/1245073>



## 第 3 版序言

本教材是上海交通大学国家级精品课程流体力学的教学用书,被列入普通高等教育“十五”国家级规划教材,于 2007 年荣获上海市优秀教材一等奖。出版后被几十所高校选用,得到业内专家和广大师生的好评。教材出版至今已有 15 年(第 1 版 2003 年,第 2 版 2013 年),为适应新形势的要求,在总结教学实践经验的基础上,参考教材使用单位反馈的信息,对教材进行再次修订。

第 3 版分为上、下两册。在形式上保持绪论篇、基础篇(上册)和专题篇(下册)的体系和枝状开放式结构;在风格上仍强调物理概念、对重要知识点讲清来龙去脉和追根求源、讲解精练;在内容上力求准确、严密和完整。本版所作的修订主要包括:

(1) 补充了新的内容。根据力学专业教师的要求,在基础篇 B2“流动分析基础”中增加了“涡运动基本概念”;对 B3“微分形式的基本方程”做了较大调整,增加了“广义牛顿应力公式”“涡动力方程”等内容,并补充了相应例题和习题。根据工程专业教师的要求,在专题篇中对“机翼升力”“圆管流动沿程损失”和“一维变截面定常等熵流”等章节做了较大篇幅的充实和修改,补充了其他教材很少介绍的知识(如兰彻斯特对机翼环流理论的贡献、科尔布鲁克管道实验、斯托拉多喷管实验等),让学生进一步感受流体力学的魅力,更清晰、完整地掌握流体力学的历史和相关知识。

(2) 为适应数字化和网络技术发展的新形势,开发了与本教材配套的数字课程资源。将文字与图片、动画、视频相结合,将课上与课下学习相结合,以拓宽学生视野,提高学习效率。通过扫描教材上的二维码,可便捷、直观地学习相关知识。

(3) 对全书文字叙述进行了梳理、润色,对公式和图表进行了勘误,以保证其可读性和科学性。对各章的习题及其答案进行了修订,以保证其准确性。

第 3 版教材主要适用于动力工程、热能工程、核工程、工程力学(对标有

\*号的内容,非力学专业可忽略)等专业的本科生,也可作为其他相关专业本科生的教材或参考书。各专业可根据专业要求和课时多少对教材中的内容进行取舍。本教材还可作为工程技术人员的参考书。

华中科技大学莫乃榕教授审阅了本教材,提出了一些有价值的意见和建议,谨表示衷心感谢。感谢上海交通大学工程力学系流体力学课程组对本版修订及数字课程建设所做的工作,感谢黄树新副教授等对习题修订所做的工作。

由于作者水平有限,教材中仍存在不当和谬误之处,敬请专家和读者指正。

作 者

2017年11月于上海交通大学

## 第 2 版序言

本教材第 1 版出版于 2003 年,当时按工科院校热能与动力工程专业(72 学时)本科生的教学要求编著。出版后得到业内专家和师生的好评,被列为普通高等教育“十五”国家级规划教材,并于 2007 年获上海市优秀教材一等奖。教材使用已有 9 年,现考虑到教学实际情况的变化,如课时压缩、使用对象的扩大(工程力学专业本科生)等,参照教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会编制的《高等学校理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求》,并参考教材使用高校所反馈的信息,对教材进行了修订。

第 2 版保持了第 1 版的内容体系、结构和风格(参见第 1 版序言)。所作的修改主要包括:

(1) 取消“D 应用与进展篇”的篇名,对其内容进行重组、增补和删节。“D1 管路系统”内容合并到新版“C3 不可压缩粘性流体内流”中,“D4 计算流体力学”内容浓缩后作为新版的附录 D。“D2 流体机械”和“D3 流体测量”则予以删除。第 2 版分为上、下两册。

(2) 为了体现流体力学基础教材的特色,删除了原版中讲解不够系统的专业性内容,如“C3.9 明渠均匀流”、“C4.8 自由湍流射流”等。进一步加强了基础性内容,如对 N-S 方程、微分和积分形式的能量方程、普朗特边界层方程、卡门动量积分方程等基本方程补充或完善了必要的推导和分析过程。这更有利于读者深刻地认识基本方程的来源、物理意义和适用条件;有利于理解在不同专题中对基本方程的应用;有助于读者在使用商业软件作数值模拟时有正确的理论指导。在“C2.8 平面势流复势解法简介”中增加了镜像法等内容。

(3) 对全书的公式和图表进行了勘误,以保证其科学性和准确性。对全书的文字进行了润色,以保证其表达的正确性,提高其可读性。

(4) 对习题作了修订。

(5) 标注\*的内容可作为选学。

第2版教材的主要适用对象是热能与动力工程、核技术与核工程、工程力学等专业的本科生,也可作为其他相关专业本科生的教材或参考书。各专业可根据专业要求和课时多少对教材中的内容进行取舍。本教材也可作为工程技术人员的参考书。

华中科技大学的莫乃榕教授审阅了第2版教材,提出了一些有价值的意见和建议,谨表示衷心感谢。感谢博士生董杰绘制了部分图表。

由于作者水平有限,教材中存在不足之处,敬请读者不吝指正。

作 者

2012年10月于上海交通大学



# 第 1 版序言

本教材为准备学习流体力学基础知识的工程专业学生编写。对这类学生,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地比对固体运动的贫乏。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 224 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,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 GB 3101—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、环境、化工及相关专业的本科生,补充少量数学推导后也可用于力学专业。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 <sup>①</sup> ,临界值
$\bar{B}$	时均值
$b$	宽度,厚度
$C$	常数,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
$c_V$	定容比热容
$c_p$	定压比热容
$D$	直径;压强中心
$d$	直径
$d_h$	水力直径
$E$	弹性模量;能量
$e$	单位质量流体的热力学能(比热力学能);压强中心纵向偏心距
$e_s$	单位体积流体的储存能
$e_r, e_\theta, e_z$	柱坐标系三个正交单位矢量

<sup>①</sup> 国家标准《有关量、单位和符号的一般原则》(GB 3101—93)称此量为量纲一的量。

$F$	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; 单位质量流体的焓(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
$k$	比例系数
$L$	长度的量纲
$L$	长度; 动量矩
$l$	长度, 混合长度
$M$	质量的量纲
$M$	力矩; 偶极矩; 浮体稳心
$Ma$	马赫数
$m$	质量
$\dot{m}$	质量流量
$N_{\text{sys}}$	系统广延量
$n$	平面法向单位; 转速
$P$	压强函数; 湿周
$P$	应力张量
$p$	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
$p_{atm}$	大气压强
$p_\infty$	无穷远压强
$p_b$	背景压强
$p_0$	总压强
$p_{ij}, \boldsymbol{p}$	表面应力张量
$Q$	流量; 热量
$\dot{Q}$	热量交换率
$q$	单位体积流体的热量
$\boldsymbol{q}_T$	单位面积上的热流量矢量
$\boldsymbol{q}_w$	单位面积上表面应力做功的功流量矢量
$q_m$	单位质量流体的热量(比热量)
$R$	半径; 气体常数
$r$	半径
$r_\xi$	回转半径
$r_h$	水力半径
$r \theta z$	柱坐标系三个坐标量 <sup>①</sup>
$SG$	相对密度
$s$	流线; 单位质量流体的熵(比熵)
$T$	时间的量纲
$T$	周期; 温度; 转矩
$T_s$	轴矩
$T_0$	总温
$t$	时间
$U$	均流速度, 牵连速度
$u v w$	直角坐标系三个速度分量
$u_m$	轴线速度, 最大速度
$u', v'$	速度脉动值
$u_*$	壁面摩擦速度
$V$	截面上的平均速度; 一点的速度大小

① 国家标准 GB 3102.11—1993 中柱坐标系三个坐标量以  $\rho, \varphi, z$  表示。



$V_r$	相对速度
$V_\infty$	无穷远速度
$v$	速度;比容
$v_r, v_\theta, v_z$	柱坐标系三个速度分量
$W$	功;重量
$\dot{W}$	功率 <sup>①</sup>
$\dot{W}_s$	轴功率
$\dot{w}$	单位质量流体所作功率
$w_v$	单位质量流体的摩擦功(比摩擦功)
$w_s$	单位质量流体的轴功(比轴功)

## 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
$\dot{\gamma}$	角变形速率
$\delta$	角度;边界层厚度
$\delta^*$	边界层位移厚度
$\varepsilon$	线应变率;粗糙度;收缩比
$\eta$	分布函数;效率
$\Theta$	温度的量纲
$\theta$	角度;边界层动量厚度
$\kappa$	导热系数
$\lambda$	达西摩擦因子;波长
$\mu$	[动力]黏度
$\nu$	运动黏度
$\xi, \eta, \zeta$	辅助坐标系三个坐标量
$\Pi$	相似准则数
$\pi$	力势函数
$\rho$	密度

<sup>①</sup> 国家标准 GB 3102.3—1993 中功率以  $P$  表示。

$\sigma$	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
$\tau_{ij}$	黏性应力张量
$\Phi$	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

# 下册目录

## 专题篇

C1 流体的平衡 .....	3
C1.1 引言 .....	3
C1.2 流体的平衡微分方程 .....	4
C1.2.1 欧拉平衡方程 .....	4
C1.2.2 等压面 .....	4
C1.2.3 流体平衡的条件 .....	6
C1.3 流体静力学基本方程 .....	7
C1.4 液体的相对平衡 .....	9
C1.4.1 等加速度直线运动 .....	10
C1.4.2 等角速度旋转运动 .....	12
C1.5 液体对平壁的总压力 .....	14
C1.5.1 平壁总压力大小 .....	15
C1.5.2 平壁总压力作用点 .....	15
C1.6 液体对曲壁的总压力 .....	19
C1.6.1 二维曲壁 .....	19
C1.6.2 三维曲壁 .....	22
C1.7 浮力与稳定性 .....	23
C1.7.1 阿基米德浮力定律 .....	23
C1.7.2 潜体与浮体的平衡 .....	24
C1.8 大气中的压强分布 .....	27
习题 .....	30