

高等学校教材

流体力学

(上册) (第2版)

丁祖荣 编著

高等学校教材

流体力学

LIUTI LIXUE

(上册) (第2版)

丁祖荣 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本教材第1版出版于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。

第2版在保持第1版的内容体系、结构和风格基础上,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》,参考使用高校的反馈信息,对部分内容进行了重组、增补和删节,并对文字、公式和图表等进行了勘误和润色。全书分为上、下两册。

上册(第2版)是绪论篇和基础篇。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。

下册(第2版)是专题篇。内容包括:流体的平衡、不可压缩无粘性流体平面势流、不可压缩粘性流体内流、不可压缩粘性流体外流、可压缩流体流动基础。

本教材可作为高等学校热能与动力工程、核技术与核工程、工程力学等专业本科生的教材,也可作为其他相关专业本科生的教材或参考书,并可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学.上册/丁祖荣编著.--2版.--北京:
高等教育出版社,2013.2

ISBN 978-7-04-036839-0

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(2013)第009013号

策划编辑 周婷	责任编辑 周婷	封面设计 李卫青	版式设计 王艳红
插图绘制 尹莉	责任校对 刁丽丽	责任印制 韩刚	

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 高教社(天津)印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 14
字 数 250千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2003年12月第1版
2013年2月第2版
印 次 2013年2月第1次印刷
定 价 20.90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 36839-00

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,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》,并参考使用高校反馈的信息,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,保证其科学性和准确性。对全书的文字进行了润色,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

II 第2版序言

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,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	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	单位体积流体的储存能
e, e_θ, 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

II 主要符号表

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	比压强;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
\dot{m}	质量流量
N_{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_∞	无穷远压强
p_b	背景压强

p_0	总压强
p_{ij}	表面应力张量
Q	体积流量;热量
\dot{Q}	热量交换率
q	单位体积流体的热量
q_r	单位面积上的热流量矢量
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_ξ	回转半径
r_h	水力半径
$r \theta z$	柱坐标系三个坐标量 ^①
SG	相对密度
s	流线;单位质量流体的熵(比熵)
T	时间量纲
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	平均速度
V_r	相对速度
V_∞	无穷远速度
v	速度;比容
v_r, v_θ, v_z	柱坐标系三个速度分量
W	功;重量
\dot{W}	功率 ^②

① 国标 GB 3102. 11—1993 中柱坐标系三个坐标量以 ρ, φ, z 表示。

② 国标 GB 3102. 3—1993 中功率以 P 表示。

IV 主要符号表

\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

α	角度,马赫角;动能修正因子
β	角度;温度系数;动量修正因子
Γ	速度环量
γ	角度;比热比
$\dot{\gamma}$	角变形速率
δ	角度;边界层厚度
δ^*	边界层位移厚度
ε	线应变率;粗糙度;收缩比
η	分布函数;效率
Θ	温度量纲
θ	角度;边界层动量厚度
κ	导热系数
λ	达西摩擦因子;波长
μ	[动力]粘度
ν	运动粘度
$\xi \eta \zeta$	辅助坐标系三个坐标量
Π	相似准则数
π	力势函数
ρ	密度
σ	表面张力;空泡数
τ	切应力;体积
τ_w	壁面切应力
τ_p	压力体
τ_{ij}	粘性应力张量
Φ	耗散函数;速度势函数
Ψ	流函数
Ω	涡量
ω	角速度,角频率

3. 其他

∇	哈密顿算子
∇^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

绪 论 篇

A1	绪论	2
A1.1	流体运动与流体力学	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
A1.2	流体力学与科学	4
A1.3	流体力学与工程技术	5
A1.4	流体力学研究方法	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
A1.5	单位制	7

基 础 篇

B1	流体及其物理性质	10
B1.1	连续介质假设	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
B1.2	流体的易变形性	12
B1.3	流体的粘性	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	18
B1.4	流体的其他物理性质	21

B1.4.1	流体的可压缩性	21
B1.4.2	表面张力	23
B1.5	流体模型分类	27
B1.5.1	无粘性流体与粘性流体	27
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
	习题	30
B2	流动分析基础	32
B2.1	描述流体运动的两种方法	32
B2.1.1	拉格朗日法	32
B2.1.2	欧拉法	33
B2.2	速度场	35
B2.2.1	流量与平均速度	36
B2.2.2	一维、二维与三维流动	38
B2.2.3	定常与不定常流动	41
B2.3	流体运动的几何描述	43
B2.3.1	迹线	43
B2.3.2	流线	44
B2.3.3	脉线	47
B2.3.4	流体线	49
B2.3.5	流管、流束与总流	49
B2.4	流体质点的随体导数	50
B2.4.1	加速度场	50
B2.4.2	质点导数	52
B2.5	一点邻域内相对运动分析	55
B2.5.1	亥姆霍兹速度分解定理	55
B2.5.2	流体元的变形	56
B2.5.3	流体元的旋转	61
B2.6	几种流动分类	64
B2.6.1	层流与湍流	64
B2.6.2	内流与外流	66
B2.6.3	无旋流动与有旋流动	68
B2.7	常用的流动分析方法	70
B2.7.1	基本的物理定律	70

B2. 7. 2	系统与控制体分析法	70
B2. 7. 3	微分与积分方法	72
B2. 7. 4	量纲分析法	73
习题	73
B3	微分形式的基本方程	75
B3. 1	微分形式的质量守恒方程	75
B3. 1. 1	流体运动的连续性原理	75
B3. 1. 2	微分形式的连续性方程	76
B3. 2	作用在流体元上的力	79
B3. 2. 1	体积力与表面力	79
B3. 2. 2	重力场	81
B3. 2. 3	流体应力场	82
B3. 3	微分形式的动量方程	85
B3. 4	纳维 - 斯托克斯方程	87
B3. 5	微分形式的能量方程	89
B3. 6	边界条件与初始条件	91
B3. 7	压强场	94
B3. 7. 1	静止流体中的压强分布	94
B3. 7. 2	压强计示方式与单位	96
B3. 7. 3	运动流体中的压强分布	99
B3. 7. 4	空化与空蚀	103
习题	105
B4	积分形式的基本方程	108
B4. 1	流体系统的随体导数	108
B4. 1. 1	控制体的选择	111
B4. 2	积分形式的连续性方程	112
B4. 2. 1	固定的控制体	112
B4. 2. 2	运动的控制体	117
B4. 3	伯努利方程及其应用	118
B4. 3. 1	沿流线的伯努利方程	118
B4. 3. 2	沿总流的伯努利方程	123
B4. 3. 3	伯努利方程的水力学意义	127
B4. 3. 4	不定常流伯努利方程	128

B4.4	积分形式的动量方程及其应用	130
B4.4.1	固定的控制体	130
B4.4.2	运动的控制体	138
B4.5	积分形式的动量矩方程	140
B4.5.1	固定的控制体	140
B4.5.2	旋转的控制体	145
B4.6	积分形式的能量方程	146
B4.6.1	固定的控制体	147
B4.6.2	能量方程与伯努利方程比较	149
	习题	151
B5	量纲分析与相似原理	157
B5.1	量纲与物理方程的量纲齐次性	157
B5.2	量纲分析与 Π 定理	160
B5.2.1	Π 定理	160
B5.2.2	量纲分析法	161
B5.3	流动相似与相似准则	165
B5.3.1	流动相似	165
B5.3.2	相似准则	166
B5.4	相似准则数的确定	167
B5.5	常用的相似准则数	170
B5.6	模型实验与相似原理	173
B5.6.1	模型实验	173
B5.6.2	相似原理	174
B5.6.3	关于相似原理的讨论	176
	习题	177
附录 A	常用流体的物理性质	180
附录 B	单位换算表	183
附录 C	有关数学公式	186
参考文献	188