

新世纪土木工程系列教材

工程流体力学

(第2版)

禹华谦 主 编 莫乃榕 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

新世纪土木工程系列教材

工程流体力学

GONGCHENG LIUTI LIXUE

(第2版)

禹华谦 主 编 莫乃榕 副主编



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

内 容 提 要

本书是新世纪土木工程系列教材之一,是在第1版基础上修订而成。本书系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。全书共分10章,内容包括绪论,流体静力学,流体动力学理论基础,量纲分析和相似理论,流动阻力与水头损失,孔口、管嘴和有压管道流动,明渠恒定流动,堰流,渗流,可压缩气体的一元流动等。书中例题力求富有创意,习题按主观性和客观性两种题型配设,书末附有习题答案。

本书可作为高等学校土建类及近土建类的土木工程、市政工程、给水排水工程、环境工程、消防工程、工程地质及水文地质、工程管理等专业的工程流体力学或水力学课程的教材,也可作为相关人员报考硕士研究生或参加国家注册工程师执业资格考试的参考书。

图 书 在 版 编 目 (C I P) 数 据

工程流体力学 / 禹华谦主编. —2版. —北京: 高等教育出版社, 2011. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 030726 - 9

I. ①工… II. ①禹… 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 246105 号

策划编辑	水 渊	责任编辑	周 婷	封面设计	王 晔
版式设计	王艳红	责任校对	俞声佳	责任印制	尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com http://www.landaco.com.cn
印 刷	化学工业出版社印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2004 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 2 版
印 张	18.25	印 次	2011 年 1 月第 1 次印刷
字 数	340 000	定 价	26.90 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 30726 - 00

教育部高等教育出版社土建类系列教材

编辑委员会委员名单

主任委员：沈蒲生(湖南大学)

副主任委员：(按姓氏笔画排序)

叶志明(上海大学)

白国良(西安建筑科技大学)

吴胜兴(河海大学)

邹超英(哈尔滨工业大学)

周绪红(兰州大学)

强士中(西南交通大学)

委员：(按姓氏笔画排序)

卫 军(中南大学)

王 湛(华南理工大学)

朱彦鹏(兰州理工大学)

江见鲸(清华大学)

李远富(西南交通大学)

张印阁(东北林业大学)

尚守平(湖南大学)

赵明华(湖南大学)

黄政宇(湖南大学)

梁兴文(西安建筑科技大学)

霍 达(北京工业大学)

王 健(北京建筑工程学院)

王清湘(大连理工大学)

刘 明(沈阳建筑大学)

杨和礼(武汉大学)

沙爱民(长安大学)

张家良(辽宁工业大学)

周 云(广州大学)

高 波(西南交通大学)

黄醒春(上海交通大学)

廖红建(西安交通大学)

出版者的话

新世纪土木工程系列教材是我社组织编写出版的“大土木”范畴的专业系列教材。1998年教育部颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》，新专业目录中土建类土木工程专业覆盖了原来建筑工程和交通土建工程等8个专业。1999年各高校已按新的专业目录招生。开设土木工程专业的各院校把近年来在教育思想与教学观念、教学内容与课程体系、教学方法与教学手段等方面取得的改革成果固化到教学计划和人才培养过程中，设计了从教学思想到教学模式等一系列教学改革方案。大家在教学实践中体会到：专业、课程教学改革必然引起相应的教材改革。我社从1999年开始进行土木工程专业系列教材的策划工作，并于2000年成立了“教育部高等教育出版社土建类系列教材编委会”。

我们编辑出版土木工程系列教材的指导思想是：

1. 紧密结合人才培养模式改革，根据拓宽专业基础、提高综合素质、增强创新能力的要求，调整学生的知识结构。

2. 从各院校调整土建类各专业教学计划出发，加强基础课程到专业课程的有机沟通，用系统的观点和方法建立新的课程体系结构，包括对课程的整合与集成，组织和建设专业核心课程，成套成系列地推出土木工程系列教材。

3. 各门课程教材要具有与本门学科发展相适应的学科水平，以科技进步和社会发展的最新成果充实、更新教材内容，贯彻理论联系实际的原则。

4. 要正确处理继承、借鉴和创新的关系，不能简单地以传统和现代划线，决定取舍，而应根据教学要求进行取舍。继承、借鉴历史和国外的经验，注意研究结合我国的现实情况，择善而从，消化创新。

5. 随着高新技术、特别是数字化和网络化技术的发展，在土木工程系列教材建设中，要充分考虑文字教材与音像、电子、网络教材的全面发展，发挥综合媒体在教学中的优势，提高教学效率。在开发研制教学软件的同时，要注意使文字教材与先进的软件接轨，明确不同形式教材之间的关系是相辅相成、相互补充的。

6. 坚持质量第一。图书是特殊的商品，教材是特殊的图书。教材质量的优

劣直接影响教学质量和教学秩序,最终影响学校人才培养的质量。教材不仅具有传播知识、服务教育、积累文化的功能,也是沟通作者、编辑、读者的桥梁,一定程度上还代表着国家学术文化或学校教学、科研水平。因此,遴选作者、审订教材、贯彻国家标准和规范等方面需严格把关。

为了实现本套教材的指导思想,我们组建了由有丰富的教学经验、有较高的学术水平和学术声望的教师组成的编委会,由编委会研究提出土木工程系列教材的选题及其基本内容与编审原则,并推荐作者。

我们出版本系列教材,旨在为新世纪的土木工程专业学生提供一套经过整合优化的比较系统的专业系列教材,以期为我国的土木工程专业教材建设贡献自己的一份力量。

本系列教材第1版出版之后,在教学实践基础上,将组织修订出版第2版、第3版,希望在不断修订过程中更新内容、消除疏漏,更加适应教学需要。

本系列教材的编写大纲和初稿、修订稿都经过了编委会的审阅,以求教材质量更臻完善。如有疏漏之处,请读者批评指正!

高等教育出版社
建筑与力学分社
2006年3月

第2版前言

根据教育部力学教学指导委员会制订的土建类专业流体力学课程教学基本要求编写的《工程流体力学》(第1版),作为高等教育出版社“新世纪土木工程系列教材”之一,于2004年1月正式出版以来,被国内众多土建院校选为工程流体力学或水力学课程教材和研究生考试参考用书,现根据学科的发展及教学实践的需要进行修订再版。

本次修订仍保持第1版的章节、顺序及主要特色,但对部分内容作了适当补充,习题作了精选,特别是考虑到国家注册工程师执业资格备考需求,增设了客观性习题,以期更能适应教学的需要。本教材也可供有关科技人员在报考硕士研究生或参加国家注册工程师执业资格考试时,进行自修或作参考书之用。

本教材由西南交通大学禹华谦教授任主编、华中科技大学莫乃榕教授任副主编。参加本书修订工作的仍是第1版的编者:禹华谦(第1、3、8章)、莫乃榕(第2、5、10章)、西南交通大学陈春光(第4、6章)和麦继婷(第7、9章)。

由于编者水平有限,书中仍不免有疏漏和不足之处,恳请读者继续给予批评指正。编者邮箱:hqyu@163.com。

编 者
2010年10月

第 1 版前言

工程流体力学是高等学校土建类各专业的一门重要技术基础课。面对科学技术的不断发展,更好地适应 21 世纪人才培养,工程流体力学课程的教学改革势在必行。本教材就是根据高等学校土建类专业流体力学教学基本要求和编者多年的教学实践,并本着加强基础理论、拓宽专业面、按大类培养的教育改革思想编写的。教材系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。在基本理论的阐述上,采用了总流分析与流场分析相结合的方法,并将控制体的概念贯穿全教材。在内容选择上,力求贯彻“少而精”原则,以恒定不可压缩流体为主,考虑到现代土建工程的需要,对可压缩气体动力学基础作了适当介绍。在计算方法上,删除了传统的图表算法,介绍了简单易学的数值计算方法,并适当增加了电算要求。另外,编写中还力求做到概念清晰、重点突出、语言简洁、富有启发性、便于教学和适当反映本学科的最新进展。

本教材可作为高等学校土建类的土木工程、市政工程、给水排水工程、环境工程、地质工程等专业的工程流体力学或水力学课程的教材,也可作为其他相近专业以及全国注册结构工程师考试的参考书。本教材包含了土建类各专业所需的内容,使用时可根据专业要求和学时多少作必要的取舍。

本教材由西南交通大学禹华谦教授主编,华中科技大学莫乃榕教授副主编。参加编写工作的有禹华谦(第 1、3、8 章)、莫乃榕(第 2、5、10 章)、西南交通大学陈春光(第 4、6 章)和麦继婷(第 7、9 章),西南交通大学研究生罗忠贤、杨庆华等参加了部分绘图工作。

北京建筑工程学院李兆年教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵的修改建议。在此表示衷心地感谢!

编者水平有限,教材中若有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月

主要符号表

1. 英文字母符号

a	加速度;墩形因数
A	面积;逆坡渠道水面曲线
b	宽度;渠道底宽
B	渠道宽度
c	声速
C	常数;谢才系数;临界坡渠道水面曲线
Ca	柯西数
C_D	绕流阻力因数
d	管径
D	管径
e	断面单位能量(断面比能)
E	单位重量流体的机械能;弹性模量
Eu	欧拉数
f	单位质量力
f_x, f_y, f_z	单位质量力在 x, y, z 坐标方向的投影
F	力
F_D	绕流阻力
Fr	弗劳德数
g	重力加速度
G	重力
h	水深;高度
h_0	正常水深(均匀流水深)
h_c	临界水深
h_f	沿程水头损失
h_j	局部水头损失
h_p	堰高
h_s	下游水位高出堰顶的高度

h_v	真空高度(真空度)
h_w	总水头损失
H	高度;水深;作用水头;水泵扬程;平坡渠道水面曲线;含水层厚度
H_0	总水头
i	渠道底坡
i_c	临界坡度
I	惯性矩
J	水力坡度
J_p	测压管水头线坡度
k	渗流系数
K	体积弹性模量;流量模数
l	长度;混合长
L	长度;集水廊道的影响范围
m	质量;边坡因数;流量因数
M	力矩;缓坡渠道水面曲线
Ma	马赫数
n	粗糙系数(糙率);转速;迭代循环次数
p	压强
p_a	大气压强
p_r	相对压强
p_v	真空压强
P	功率
P_e	有效功率(输出功率)
P_x	轴功率(输入功率)
q	单宽流量
q_v	体积流量
Q	热量
r	半径
r_0	井的半径;管道半径
R	定倾半径;水力半径;阻抗;井的影响半径;气体常数
Re	雷诺数
s	沿流程坐标
S	距离;比阻;急坡渠道水面曲线;井的水位降深
t	时间;摄氏温度;含水层厚度

T	热力学温度
u	点流速
u_*	摩阻速度
$u_{\max}$	过流断面上最大流速;管轴线上的流速
U	速度
v	速度;断面平均流速
V	体积
W	质量力势函数
We	韦伯数
x, y, z	笛卡儿坐标
y_c	形心坐标
y_D	压力中心坐标
z	位置水头

2. 希腊字母符号

α	角度;动能修正因数;充满度
β	动量修正因数
χ	湿周
δ	边界层厚度;堰顶厚度
δ_0	粘性底层厚度
ε	侧收缩因数
φ	流速因数
φ_n	管嘴流速因数
Φ	速度势函数
γ	角变形速度;比热比
η	效率
κ	体积压缩率
λ	沿程损失因数
μ	动力粘度;流量因数
μ_n	管嘴流量因数
ν	运动粘度
π	圆周率
θ	角度
ρ	密度
σ	表面张力

τ	切应力
τ_0	边壁切应力
ω	角速度
ψ	垂向收缩因数
Ψ	流函数
ζ	局部损失因数

目 录

第 1 章 绪论	1	§ 3-8 理想流体无旋流动简介 ...	70
§ 1-1 概述	1	习题	75
§ 1-2 流体的连续介质模型	3	第 4 章 量纲分析和相似理论 ...	81
§ 1-3 流体的主要物理性质	4	§ 4-1 量纲分析的概念和原理 ...	81
§ 1-4 作用在流体上的力	9	§ 4-2 量纲分析法	84
习题	10	§ 4-3 流动相似性原理	88
第 2 章 流体静力学	12	§ 4-4 相似准则	91
§ 2-1 静止流体的应力特征	12	§ 4-5 相似原理应用	94
§ 2-2 流体静止的微分方程	14	习题	98
§ 2-3 重力作用下静止液体的 压强分布	16	第 5 章 流动阻力与水头 损失	101
§ 2-4 液体的相对静止	18	§ 5-1 水头损失的两种形式	101
§ 2-5 测压计	22	§ 5-2 粘性流体运动的两种 流态	103
§ 2-6 静止液体作用在平面上 的总压力	26	§ 5-3 圆管层流	106
§ 2-7 静止液体作用在曲面上 的总压力	29	§ 5-4 湍流运动的特点	108
§ 2-8 潜体和浮体的平衡 及稳定	33	§ 5-5 边界层理论简介	111
习题	36	§ 5-6 圆管湍流速度分布	117
第 3 章 流体动力学理论基础 ...	41	§ 5-7 沿程损失因数的变化 规律	123
§ 3-1 描述流体运动的方法	41	§ 5-8 局部水头损失	131
§ 3-2 研究流体运动的若干 基本概念	43	习题	136
§ 3-3 流体运动的连续性方程 ...	47	第 6 章 孔口、管嘴和有压 管道流动	140
§ 3-4 理想流体的运动微分 方程及其积分	51	§ 6-1 孔口恒定出流	140
§ 3-5 伯努利方程	53	§ 6-2 管嘴恒定出流	143
§ 3-6 动量方程	61	§ 6-3 孔口(或管嘴)的变水头 出流	145
§ 3-7 流体微团运动的分析	65	§ 6-4 短管的水力计算	146
		§ 6-5 长管的水力计算	153

§ 6-6 管网水力计算基础	159	§ 8-4 宽顶堰溢流	216
§ 6-7 离心式水泵及其水力 计算	163	§ 8-5 小桥孔径水力计算	219
§ 6-8 水击简介	167	习题	223
习题	171	第 9 章 渗流	226
第 7 章 明渠恒定流动	177	§ 9-1 渗流基本定律	226
§ 7-1 明渠的分类	177	§ 9-2 地下水的均匀流和非 均匀流	229
§ 7-2 明渠均匀流	178	§ 9-3 集水廊道和井	232
§ 7-3 无压圆管均匀流	184	§ 9-4 井群	237
§ 7-4 明渠恒定非均匀流动的 若干基本概念	186	习题	239
§ 7-5 水跃和水跌	191	第 10 章 可压缩气体的 一元流动	242
§ 7-6 明渠恒定非均匀渐变流 的基本微分方程	194	§ 10-1 可压缩气体的物理 性质	242
§ 7-7 棱柱形渠道中恒定非 均匀渐变流的水面 曲线分析	196	§ 10-2 可压缩气体一元流动的 基本方程	244
§ 7-8 棱柱形渠道中恒定非 均匀渐变流水面 曲线的计算	201	§ 10-3 微弱压力扰动的 传播 声速	246
习题	205	§ 10-4 可压缩气体在管道中的 流动	251
第 8 章 堰流	210	§ 10-5 隧道空气动力学基础 ...	259
§ 8-1 堰流的定义及堰 的分类	210	习题	262
§ 8-2 堰流基本公式	212	主要参考文献	264
§ 8-3 薄壁堰溢流	213	习题答案	265
		名词索引	270

第 1 章 绪 论

§ 1-1 概 述

1-1-1 工程流体力学的任务

工程流体力学是研究流体的机械运动规律及其实际应用的科学,是工程力学的分支学科。

自然界物质存在的主要形式是固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。从力学分析的角度看,流体与固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体一般可以抵抗拉力、压力和剪力,而流体则几乎不能承受拉力,处于平衡状态的流体还不能抵抗剪力,即流体在很小的剪力作用下将发生连续不断的变形。流体的这种宏观力学特性称为易流动性。易流动性既是流体命名的由来,也是流体区别于固体的根本标志。至于气体与液体的差别则主要在于气体易于压缩,而液体难于压缩;另外,液体能形成自由表面,而气体则不能。本教材根据土建类专业的要求,主要讨论液体的运动规律,只在最后一章简单介绍了一些可压缩气流的基本知识。

1-1-2 工程流体力学的发展简史

同其他自然科学一样,工程流体力学也是随着生产实践而发展起来的。早在几千年前,由于治河、航运、农业、交通和市政等事业的发展,人们便开始了解一些水流运动的基本规律。如相传四千多年以前的大禹治水,“疏壅导滞”使滔滔洪水各归于河,表明我国古代进行过大规模的治河防洪工作。秦代在公元前 256—公元前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程,说明当时对明渠水流和堰流已有一定的认识。又如距今已近 1400 年而依然保持完好的赵州桥,在主拱圈两边各设有两个小腹拱,既减轻了主拱的负载,又可泄洪,说明当

时人们对桥涵水力学已有相当的认识。一般认为,工程流体力学萌芽于公元前 250 年左右古希腊科学家阿基米德(Archimedes)写的《论浮体》,该文对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。

16 世纪以后,随着资本主义制度的兴起,生产力得以迅速发展,自然科学如数学、力学等也发生了质的飞跃。这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。18 世纪,在伽利略(Galileo) - 牛顿(I. Newton)力学基础上形成的古典流体力学(或称古典水动力学),用严格的数学分析方法建立了流体运动的基本方程,为工程流体力学奠定了理论基础。但古典流体力学或由于理论的假定与实际不尽相符,或由于求解上的困难,尚难以解决各种实际问题。为了满足生产发展的需要,依靠试验和实测资料而形成的实验流体力学(或称实验水力学)相应得到了发展,它为人们提供了许多计算有压管流、明渠水流、堰流等实际问题的经验公式和图表。但实验流体力学由于理论指导不足,其成果往往具有一定的局限性,难以解决各种复杂的工程问题。

19 世纪末以来,随着生产技术的发展,尤其是航空方面的理论和实验的迅速发展,导致了古典流体力学与实验流体力学的日益结合,逐渐形成了理论与实验并重的现代流体力学(或称流体力学)。现代流体力学建立在古典流体力学的基础上,根据古典流体力学的基本理论和现代的湍流理论、边界层理论以及量纲分析与相似理论等,结合实验、实测数据和经验公式,来探索实际流体运动的基本规律。一般将侧重于理论方面的流体力学称为理论流体力学,而侧重于应用的称为工程流体力学或应用流体力学。

近几十年来,流体力学学科随着现代生产建设的迅速发展和科学技术的进步而不断发展,研究范围和服务领域越来越广,新的学科分支亦不断涌现,如现已派生出计算流体力学、环境流体力学、工业流体力学、生物流体力学等许多新的学科分支。由此可见,流体力学既是一门古老的学科,又是一门富有生机的学科。

1-1-3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学的研究方法一般有理论分析、实验研究和数值模拟三种。

理论分析方法是根据工程实际中流动现象的特点和物质机械运动的普遍规律,建立流体运动的基本方程及定解条件,然后运用各种数学方法求出方程的解。理论分析法的关键在于提出理论模型(亦称数学模型),并能运用数学方法求出揭示流体运动规律的理论结果。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

实验研究在工程流体力学中占有极为重要的地位,它是理论分析结果正确与否的最终判决。实验研究方法是通过对具体流动的观测,来认识流体运动的规律。工程流体力学的实验研究主要包括原型观测、系统实验和模型实验,而以

模型实验为主。

数值模拟又称数值实验,是伴随现代计算机技术及其应用而出现的一种方法。它广泛采用有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法以及谱方法等将工程流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为数值模型,用计算机求得定量描述流体运动规律的数值解。

以上三种方法相互结合,为发展流体力学理论和解决复杂的工程流体力学问题奠定了基础。本教材主要介绍理论分析和实验研究方法。至于数值模拟,本教材不作介绍,读者可参阅有关计算流体力学或计算水力学书籍。

1-1-4 流体力学在土木工程中的应用

工程流体力学在土木工程中有着广泛的应用。例如,在市政建设中,有诸如城市防洪工程设计、城市给水排水管网设计、取水口的布置、水塔高度的计算、水泵的选择和井的产水量计算等;在供热通风设计中,有诸如热的供应、空气的调节、燃气的输配、排毒排湿、除尘降温的计算等;在建筑及交通土建工程中,有诸如室内给水排水设计、地基降水及抗渗设计、桥涵孔径水力设计、站场及路基排水设计、隧道及地下工程通风和排水设计、高速铁(公)路隧道洞型设计等。

随着生产建设的发展,还将会不断地提出新的课题。相信工程流体力学将会发挥更大的作用,学科本身也将会得到更大的发展。

§ 1-2 流体的连续介质模型

流体是由大量不断地作无规则热运动的分子所组成。从微观角度看,由于分子之间存有空隙,因此流体的物理量如密度、压强、流速等在空间上的分布是不连续的;同时,由于流体分子不断地作随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。显然,以离散的分子为对象来研究流体的运动将是极其复杂的。

现代物理研究表明,在标准状况下,1 cm³ 液体中约含有 3.3×10^{22} 个分子,相邻分子间的距离约为 3.1×10^{-8} cm; 1 cm³ 气体中约含有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子间的距离约为 3.2×10^{-7} cm。可见,流体分子间的距离是相当微小的,在很小的体积中已包含了难以计数的分子。在一般工程中,所研究流体的空间尺度远比分子尺寸大得多,而且要解决的实际问题又不是流体微观运动的特性,而是流体宏观运动的特性,即大量分子运动的统计平均特性。基于上述原因,1753 年瑞士学者欧拉(L. Euler)提出了流体的连续介质假说,即认为流体所占有的空间连续而无空隙地充满着流体质点(亦称流体微团),质点的尺度在微观上足够大,大到能包含大量的分子,使得在统计平均后能得到其物理量的确定值;而在宏观上又足够小,远小于所研究问题的特征尺度,使得其平均物理量可