

国家工科基础课程力学教学基地系列教材



AR 超媒体系列教材

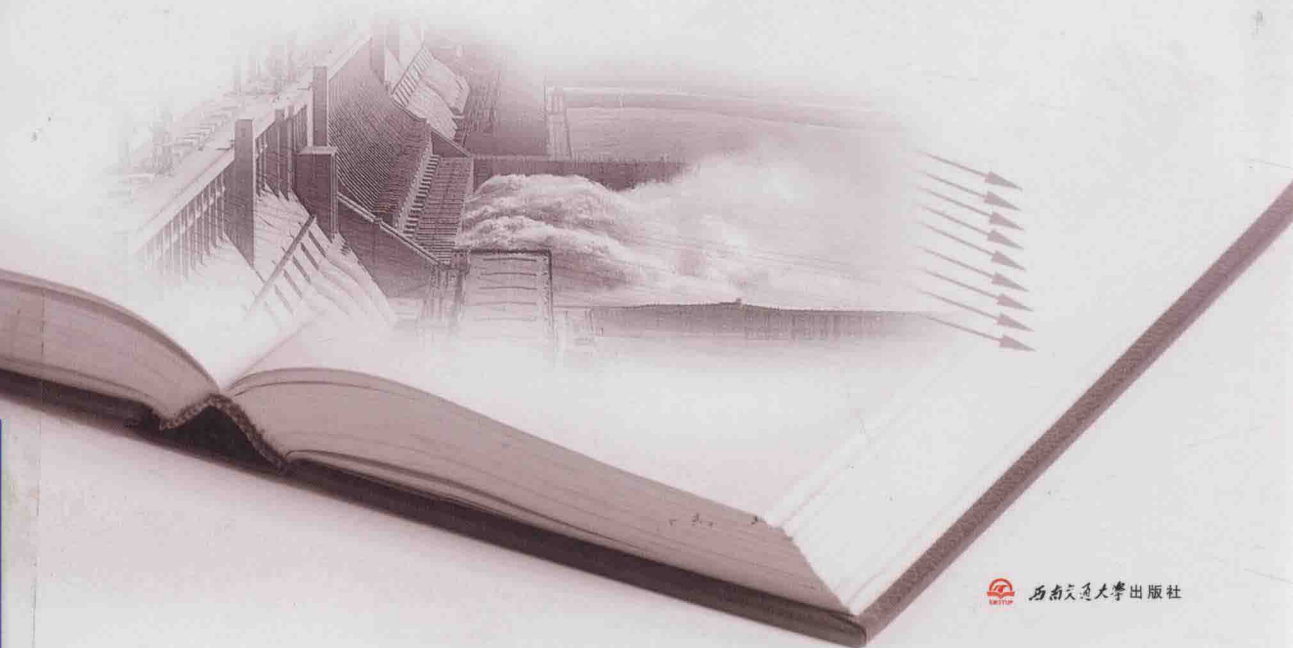
工程流体力学 (水力学)

(第四版)

GONGCHENG LIUTI LIXUE
(SHUILIXUE) (DISIBAN)

禹华谦 / 主编

西南交通大学国家工科基础课程力学教学基地 / 组编



西南交通大学出版社

教学基地系列教材

工程流体力学

(水力学)

第四版

禹华谦 主编

陈春光 麦继婷 编

西南交通大学国家工科基础课程力学教学基地 组编



微信扫描二维码获取本书数字资源

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

工程流体力学：水力学 / 禹华谦主编. —4 版. —
成都：西南交通大学出版社，2018.8
ISBN 978-7-5643-6256-0

I. 工… II. ①禹… III. ①工程力学—流体力学—
高等学校—教材②水力学—高等学校—教材 IV.
①TB126②TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 131918 号

工程流体力学 (水力学)

第四版

禹华谦 主编

*

责任编辑 万 方

特邀编辑 麦继婷

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼

邮政编码：610031 发行部电话：028-87600564

<http://www.xnjdcbs.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

*

成品尺寸：185 mm×260 mm 印张：18.25

字数：454 千字

2018 年 8 月第 4 版 2018 年 8 月第 19 次印刷

ISBN 978-7-5643-6256-0

定价：49.80 元

图书如有印装问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

第四版前言

本书作为西南交通大学“国家工科基础课程力学教学基地系列教材”之一,自2013年6月出版第三版以来,被国内众多土建院校广泛选作工程流体力学或水力学课程教材和硕士研究生入学考试参考书。现根据学科的发展及教学实践的需要再次进行修订。

本次修订仍保持第三版的章节、顺序及主要特色。除对部分内容作了适当补充、部分例题及习题作了精选外,主要考虑随着高新技术特别是数字化和网络技术的发展,增加了与教材配套的数字课程资源内容,以期新版教材更能适应教学的需要,并可供有关科技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进行自修或作参考书之用。

本书由西南交通大学禹华谦教授主编,参加本书修订工作的有:禹华谦(第一、二、三、八、十章)、陈春光(第四、六、九章)、麦继婷(第五、七章)和罗忠贤(全书数字课程资源)。

在数字课程资源建设方面,得到了西南交通大学出版社李文熠老师的指导和帮助,在此表示衷心感谢!

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

编 者

2018年6月

第三版前言

本书自 2007 年 3 月再版以来,再次被国内多所高等院校的土建类专业广泛选作工程流体力学或水力学课程教材以及硕士研究生入学考试的指定参考书,并被部分省市高等教育自学考试委员会指定为相关专业的自学考试教材。该书于 2008 年获第八届全国高校出版社优秀畅销书二等奖。现根据学科发展、编者的教学实践心得和读者建议等对本书再次进行修订。

本次修订仍保持第二版的章节、顺序及主要特色,但对部分内容作了适当补充,部分例题和习题作了精选,并对原书进行了勘误。为便于阅读,新增了教材所用主要符号表。另外,为使新版教材更能适应教学需要,便于有关科技人员参加国家注册工程师执业资格基础考试,对原书明渠恒定非均匀流动和渗流等章节中有关水面(或浸润)曲线的分区及各型曲线名称改为与国内外同类教材一致,局部水头损失 h_m 、临界水深 h_K 两个符号分别改为 h_j 和 h_c 。

本书由禹华谦教授主编,参加本书修订工作的仍为第二版的编者:禹华谦(第一、二、三、八、十章)、陈春光(第四、六、九章)和麦继婷(第五、七章)。

黄宽渊教授对本书修订提出了不少指导性意见,高迅、杨庆华、王耀琴、罗忠贤、郭瑞、武小菲等老师参加了修订工作讨论,另外,本次修订也吸取了部分兄弟院校教师和读者提出的宝贵意见,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中仍不免有疏漏和不足之处,敬请读者继续给予批评指正。

编者

2013 年 2 月于西南交通大学

第二版前言

本书第一版自 1999 年问世以来,被西南交通大学、重庆大学、兰州交通大学、福州大学、西南石油大学等多所高等院校的土建类专业广泛用作工程流体力学或水力学课程教材以及硕士研究生入学考试的指定参考书。现根据学科的发展及教学实践的需要修订再版。

本次修订保持了原来的章节和顺序,但对部分内容作了改写和适当补充,以期新版教材更能适应教学的需要。

本书由禹华谦主编,参加本书修订工作的仍为第一版编者:禹华谦(第一、二、三、八、十章)、陈春光(第四、六、九章)和麦继婷(第五、七章)。

由于编者水平有限,书中仍难免有错误和缺点,恳请读者继续给予批评指正。

编 者

2007 年 2 月于西南交通大学

前 言

工程流体力学(水力学)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,为了更好地适应 21 世纪人才培养的要求,工程流体力学(水力学)课程的改革势在必行。本教材就是根据高等学校土建类专业的水力学教学基本要求和作者们多年的教学实践,并考虑目前加强理论基础、拓宽基础知识面、按大类培养的教改思想编写的。教材系统地阐述了工程流体力学(水力学)的基本概念、基本理论和基本工程应用。在基本理论的论述上采用总流分析与流场分析相结合的方法,并将控制体概念贯穿全书。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,同时对可压缩气体动力学基础知识作了适当介绍。在计算方法上,以常见的传统方法为主,考虑到学生编程上机能力的普遍提高,并适当增加了电算要求。另外,在编写中,还力求做到基本原理、概念阐述正确清晰,重点突出,文字简明,富有启发性,便于教学和适当反映本门学科的先进水平。

为了巩固基础理论和培养学生分析计算能力,各章均精选了一定数量的例题和习题。为便于应用,书末附有习题答案。

本教材可作为高等学校土建类的土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑环境与设备工程和地质工程等有关专业的本科、专科(包括自学考试、函授)的教材,也可作为其他相近专业的教材和参考书。由于书中包含了土建类各专业所需要的内容(其中打*者为加深加宽内容),使用时,可根据专业要求和学时多少做必要的取舍。

本教材采取集体讨论、分工执笔的方式完成。初稿完成后,几经试用,并经多次讨论和修改,最后才形成定稿。全书由禹华谦主编,参加编写工作的有禹华谦(第一、二、三、八、十章)、陈春光(第四、六、九章)和麦继婷(第五、七章)。还有高迅、綦小平等参加了讨论工作。

黄宽渊教授、姜兴华副教授等对本书初稿提出了不少宝贵意见,另外,西南交通大学出版社对本书的出版给予了大力支持,在此一并表示衷心感谢!

由于编者知识和水平有限,书中错误与缺点在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 9 月于西南交通大学

AR 超媒体数字资源目录

序号	章	节	资源名称	资源类型	页码
1	第一章 绪论	1-3 流体的主要物理性质	牛顿平板实验	模型	P5
2			牛顿内摩擦定律	模型	P6
3	第二章 流体静力学	2-5 流体的相对平衡	等角速旋转容器内液体的相对平衡	动画	P22
4		2-8 潜体和浮体的平衡与稳定性	潜体的平衡及稳定性	模型	P30
5	第三章 流体动力学 理论基础	3-2 研究流体运动的若干基本概念	流谱	动画	P42
6		3-6 动量方程	欧拉型动量方程	动画	P59
7			平板射流	模型	P61
8			矩形断面平坡渠道水流	动画	P62
9		3-8 流体微团运动的分析	无旋流动与有旋流动	动画	P68
10		3-9 恒定平面势流简介	二元半体绕流	动画	P75
11	第四章 量纲分析与相似理论	4-3 流动相似性原理	动力相似	动画	P91
12	第五章 流动阻力与 水头损失	5-2 实际流体流动的两种模型	雷诺实验	动画	101
13		5-5 元关中的紊流运动	黏性底层	动画	110
14		5-7 边界层理论简介	二元均匀流绕圆柱体流动	动画	121
15		5-8 局部水头损失	紊流状态的局部水头损失	动画	124

续表

序号	章	节	资源名称	资源类型	页码
16	第六章 孔口、管嘴和 有压管道流动	6—1 孔口及管嘴恒定出流	薄壁小孔口恒定出流	动画	P139
17			管嘴出流	动画	P142
18		6—6 离心式水泵及其水力计算	离心式水泵工作原理	动画	P162
19		6—7 水击简介	水击的发生过程及分析	动画	P167
20	第七章 明渠恒定流动	7—3 明渠恒定非均匀流动的若干基本概念	河渠架桥的非均匀流动	动画	P186
21			明渠中的急流与缓流的水流现象	动画	P191
22		7—6 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	水流的渐变流段与局部现象	动画	P198
23	第八章 堰流	8—1 堰流的定义及堰的分类	堰的分类	动画	P220
24		8—3 薄壁堰	矩形薄壁正堰的溢流	动画	P222
25		8—5 宽顶堰	自由式宽顶堰的水流现象	动画	P226
26			淹没式宽顶堰的水流现象	动画	P226
27		8—6 小乔孔径水力计算	自由式小桥过水	动画	P230
28			淹没式小桥过水	动画	P230
29	第九章 渗流	9—1 渗流基本规律	常水头实验法	动画	P240
30			变水头实验法	动画	P242
31		9—3 集水廊道和井	集水廊道	动画	P246
32			完全潜水井	动画	P247
33			大口井的渗流	动画	P250
34		9—5 流网及其在渗流计算中的应用	有板桩的混凝土坝坝基和闸基渗流	动画	P253
35	第十章 可压缩气体的一元恒定流动	10—1 音速和马赫数	扰动在气流中的传播情况	动画	P260

主要符号表

本表包括各章通用的主要符号的意义,其他局部使用的符号则在出现时说明。

1. 英文字符号

a	加速度;墩形系数
A	面积;逆坡渠道水面曲线
b	宽度;渠道底宽
B	渠道液面宽度;桥梁(涵洞)标准孔径
c	水击波速;声速
C	常数;谢才系数;临界坡渠道水面曲线
Ca	柯西数
C_D	绕流阻力系数
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 坐标方向的分量
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;液柱高度
h_0	正常水深(均匀流水深)
h_c	收缩水深
h_C	临界水深
h_f	沿程水头损失
h_j	局部水头损失
h_p	水银测压计读数
h_w	总水头损失
h_v	真空高度(真空度)
H	高度;水深;总水头;水泵扬程;平坡渠道水面曲线;含水层厚度

H_0	作用水头
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;普兰特混合长度
L	长度;集水廊道影响距离
m	质量;边坡系数;流量系数
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
N	功率
N_e	有效功率(输出功率)
N_x	轴功率(输入功率)
p	压强;相对压强(计示压强、表压强);堰高
p'	绝对压强
p_a	大气压强
p_v	真空压强(真空值)
P	压力
q	单宽流量
Q	(体积)流量
r	半径
r_0	井的半径
R	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;承压含水层厚度
T	绝对温度
u	点流速
v_*	剪切速度
$u_{\max}$	过流断面上最大流速;管轴线上的流速
U	速度
v	断面平均流速
V	体积
V_P	压力体体积

W	质量力势函数
We	韦伯数
x, y, z	笛卡尔坐标
y_C	形心坐标
y_D	压力中心坐标
z	位置水头

2. 希腊字符号

α	角度;动能修正系数;充满度
β	动量修正系数
χ	湿周
δ	边界层厚度;堰顶厚度
δ_l	黏性底层厚度
Δ	下游水位高出堰顶的高度;绝对粗糙度
ε	侧向收缩系数
φ	速度势函数;流速系数
φ_n	管嘴流速系数
γ	重度;角变形速度;比热比
γ_p	水银重度
η	效率
κ	体积压缩系数
λ	沿程阻力系数
μ	动力黏度;流量系数
μ_n	管嘴流量系数
ν	运动黏度
π	圆周率
θ	角度
ρ	密度;定倾半径
σ	表面张力系数
τ	切应力
τ_0	边壁切应力
ω	角速度
φ	流函数;垂向收缩系数
ζ	局部阻力系数

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1-1 工程流体力学的任务及发展简史	1
§ 1-2 流体的连续介质模型	2
§ 1-3 流体的主要物理性质	3
§ 1-4 作用在流体上的力	9
§ 1-5 工程流体力学的研究方法	10
习 题	11
第二章 流体静力学	12
§ 2-1 平衡流体中的应力特征	12
§ 2-2 流体平衡的微分方程及其积分	14
§ 2-3 重力作用下流体静压强的分布规律	16
§ 2-4 流体压强的测量	20
§ 2-5 液体的相对平衡	22
§ 2-6 静止液体作用在平面上的总压力	23
§ 2-7 静止液体作用在曲面上的总压力	26
§ 2-8 潜体和浮体的平衡与稳定性	29
习 题	33
第三章 流体动力学理论基础	39
§ 3-1 描述流体运动的方法	39
§ 3-2 研究流体运动的若干基本概念	41
§ 3-3 流体运动的连续性方程	46
§ 3-4 理想流体的运动微分方程及其积分	49
§ 3-5 伯努利方程	51
§ 3-6 动量方程	58
§ 3-7 动量矩方程	64
§ 3-8 流体微团运动的分析	64
§ 3-9 恒定平面势流简介	70
习 题	76
第四章 量纲分析与相似理论	83
§ 4-1 量纲分析的概念和原理	83
§ 4-2 量纲分析法	85

§ 4-3	流动相似性原理	89
§ 4-4	相似准则	91
§ 4-5	模型试验设计	94
习 题		97
第五章 流动阻力与水头损失		100
§ 5-1	流动阻力与水头损失的两种形式	100
§ 5-2	实际流体流动的两种型态	101
§ 5-3	均匀流动的沿程水头损失和基本方程式	103
§ 5-4	圆管中的层流运动	104
§ 5-5	圆管中的紊流运动	106
§ 5-6	沿程阻力系数的变化规律及影响因素	113
§ 5-7	边界层理论简介	121
§ 5-8	局部水头损失	123
§ 5-9	紊流扩散	130
* § 5-10	绕流问题	132
习 题		134
第六章 孔口、管嘴和有压管道流动		139
§ 6-1	孔口及管嘴恒定出流	139
* § 6-2	孔口(或管嘴)的变水头出流	143
§ 6-3	短管的水力计算	144
§ 6-4	长管的水力计算	150
§ 6-5	管网水力计算基础	157
§ 6-6	离心式水泵及其水力计算	162
* § 6-7	水击简介	165
习 题		168
第七章 明渠恒定流动		174
§ 7-1	明渠的分类	174
§ 7-2	明渠均匀流	175
§ 7-3	明渠恒定非均匀流动的若干基本概念	186
§ 7-4	水跃和跌水	193
§ 7-5	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	197
§ 7-6	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	198
§ 7-7	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	204
* § 7-8	天然河道中水面曲线的计算	211
习 题		214
第八章 堰 流		219
§ 8-1	堰流的定义及堰的分类	219
§ 8-2	堰流基本公式	220
§ 8-3	薄壁堰	222

* § 8-4 实用断面堰	225
§ 8-5 宽顶堰	226
§ 8-6 小桥孔径水力计算	229
§ 8-7 消力池水力计算	234
习 题	237
第九章 渗 流	239
§ 9-1 渗流基本定律	239
§ 9-2 地下水的均匀流和非均匀流	242
§ 9-3 集水廊道和井	246
§ 9-4 井 群	250
* § 9-5 流网及其在渗流计算中的应用	252
习 题	256
第十章 可压缩气体的一元恒定流动	258
§ 10-1 音速与马赫数	258
§ 10-2 理想气体一元恒定流动的基本方程	261
§ 10-3 滞止参数	263
§ 10-4 可压缩气体在等截面管道中的恒定流动	265
习 题	268
附录 I 本书常用的国际单位与工程单位对照表	270
附录 II 各种粗糙面的粗糙系数 n	271
习题答案	272
参考文献	276

第一章 绪 论

§ 1-1 工程流体力学的任务及发展简史

工程流体力学是研究流体机械运动规律及其实际应用的一门科学。它是工程力学的一个分支。

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。固体可以抵抗一定的拉力、压力和剪力。而流体则几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪力,即流体在很小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。本书主要探讨液体的运动规律,在最后一章,也简单介绍一些可压缩气流的基础知识。

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、农业、航运、交通等事业的发展,人们开始了解一些水流运动的规律。如相传 4000 多年前的大禹治水,表明我国古代进行过大规模的治河工作。秦代在公元前 256—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,又利于泄洪,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 年左右希腊科学家阿基米德(Archimedes)写的《论浮体》,该文对静止时液体的力学性质作了第一次科学总结。

16 世纪以后,资本主义制度兴起,生产力迅速发展,自然科学(如数学、力学)亦发生了质的飞跃。这些都给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-牛顿力学基础上形成的古典流体力学(或称古典水动力学)得到了发展。它用严格的数学分析方法建立了流体的基本运动方程,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,或由于求解上的数学困难,尚难以解决各种实际问题。为了满足生产发展的需要,依靠实验和实测资料而形成的实验流体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)。它是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紊流理论、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;侧重于应用的,称为工程流体力学或应用流体力学。若研究对象主要是液流,且又侧重于应用的,则称为工程流体力学(水力学)。

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、随机流体力学、环境流体力学、能源流体力学、工业流体力学等新的学科分支。所以,流体力学既是一门古老的学科,又是一门富有生机的学科。

本书根据土建专业大类的需要,主要介绍一些工程流体力学(水力学)的内容。

工程流体力学在土建工程中有着广泛的应用。如城市的生活和工业用水,一般都是从水厂集中供应,水厂利用水泵把河、湖或井中的水抽上来,经过净化和消毒处理后,再通过管路系统把水输送到各用户,有时,为了均衡负荷,还需要修建水塔。这样,就需要解决一系列工程流体力学问题,如取水口的布置、管路布置、水管直径和水塔高度等的计算,水泵容量和井的产水量计算等等。又如在供热通风及燃气工程设计中,同样需要解决一系列工程流体力学问题,如热的供应、空气的调节、燃气的输配、排毒排湿、除尘降温的设计计算等等。在修建铁路及公路、开凿航道、设计港口等工程时,也必须解决一系列工程流体力学问题,如桥涵孔径的设计,站场、路基排水设计,隧道及地下工程通风和排水设计以及高速铁(公)路隧道洞型设计等等。

随着生产的发展,还将会不断地提出新的课题。相信在今后的经济建设中,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。从微观的角度看,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,由于分子作随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。

现代物理学研究表明,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,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,而且要解决的实际工程问题又不是流体微观运动的特性,而是流体的宏观特性,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)提出了一个基本假说,即认为流体是由其本身质点毫无空隙地聚集在一起、完全充满所占空间的一种连续介质。把流体视为连续介质后,流体运动中的物理量均可视为空间和时间的连续函数,这样,就可利用数学中的连续函数分析方法来研究流体运动。实践证明,采用流体的连续介质模型,解决一般工程(包括土木工程)中的流体力学问题是可以满足要求的。

为了深入了解连续介质的概念,现讨论某点处流体的密度。如图 1-1(a)所示,取包含 A(x, y, z) 点的微元体积 ΔV , 在此体积中的流体质量为 Δm , 则其相应的平均密度为 $\Delta m / \Delta V$ 。图 1-1(b)示出了平均密度 $\Delta m / \Delta V$ 对 ΔV 的实验结果。