

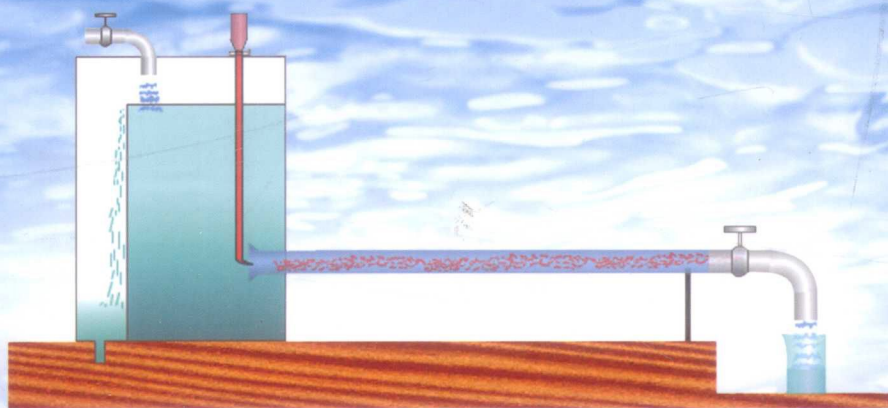


普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

# 工程流体力学及 环境应用

宋洪庆 主编



冶金工业出版社  
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

# 工程流体力学及环境应用

宋洪庆 主编

国家出版基金项目 (CIP)

工业和信息化部 北京理工大学 机械工业出版社 工程流体力学及环境应用 宋洪庆主编 北京 冶金工业出版社 2016.7

ISBN 978-7-5024-7321-1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7321-1

I. ①工... II. ①宋... III. ①工程力学—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第127620号

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第127620号

冶金工业出版社

地址 北京市东城区安定门内大街28号 邮编 100009 电话 (010) 64032326

网址 www.cninfo.com.cn 电子邮箱 jcb@cninfo.com.cn

冶金工业出版社

000000

冶金工业出版社 北京 (010) 64032326 冶金工业出版社 北京 (010) 64032326

冶金工业出版社 北京 (010) 64032326 冶金工业出版社 北京 (010) 64032326

北京  
冶金工业出版社

2016

## 内 容 提 要

本书共分为 11 章,详细地阐述了流体力学的基本理论及其在环境领域的应用。主要内容包括:流体力学的基本概念,流体静力学,流体动力学基础,流体的流动阻力计算,有压管流与孔口、管嘴出流,渗流力学基础,流体机械之泵与风机,相似原理与量纲分析,大气污染扩散基础及应用,海洋石油污染运移分析及控制,CO<sub>2</sub>封存流动理论基础及应用。本书每章末都附有相关习题,书末附有习题参考答案。

本书主要作为高等学校环境工程、安全工程、资源工程、土木工程、石油工程、海洋工程等专业教学用书,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学及环境应用/宋洪庆主编. —北京:冶金工业出版社, 2016. 7

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7251-1

I. ①工… II. ①宋… 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 (2016) 第 127650 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 杨帆

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7251-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2016年7月第1版,2016年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.5印张; 350千字; 221页

32.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

随着研究型教学改革不断深入，高校培养目标越来越重视提高学生独立解决问题能力、实际应用分析能力和创新研究能力，这为流体力学教学和科研提出了更高的要求。本书是为了适应环境专业流体力学课程教学及科研需要编写而成的。

全书共分为11章。第1~8章是工程流体力学部分，内容包括绪论，流体静力学，流体动力学基础，流体的流动阻力计算，有压管流与孔口、管嘴出流，渗流力学基础，流体机械之泵与风机，相似原理与量纲分析；第9~11章是环境领域流体力学应用，内容包括大气污染扩散基础及应用，海洋石油污染运移分析及控制，CO<sub>2</sub>封存流动理论基础及应用。书中每章都配有一定量的理论结合工程实际的例题和习题，帮助学生更加深刻理解每章的重点概念和关键理论，同时也培养了学生解决实际工程问题的能力。

本书在编写过程中，参考了国内外知名高校环境科学与工程、资源工程、石油工程、海洋工程等专业的培养方案和教材，查阅大量参考文献，紧密结合实际，先是重点讲解流体力学的基本概念、原理和方法，然后针对地上、地表和地下三个空间环境领域应用分析，分别介绍大气污染扩散、海洋石油污染流动和二氧化碳封存流动的理论知识及模拟技术，为学生掌握流体力学基本知识和专业应用提供理论基础。

本书由宋洪庆主编，赵怡晴为副主编，王九龙、李正一、贾宝昆等参加编写。清华大学王沫然教授、北京科技大学朱维耀教授和宋存义教授审阅了本书初稿，为全书的修改提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正！

编 者

2016年4月

# 目 录

1	绪论	1
1.1	1.1 流体力学的概念与发展简史	1
1.1.1	1.1.1 流体力学概念	1
1.1.2	1.1.2 流体力学的发展历史	1
1.1.3	1.1.3 流体力学的研究方法	2
1.2	1.2 流体的连续介质模型	3
1.2.1	1.2.1 流体质点的概念	3
1.2.2	1.2.2 流体的连续介质模型	4
1.3	1.3 量纲和单位	4
1.3.1	1.3.1 量纲	5
1.3.2	1.3.2 单位	5
1.4	1.4 流体的主要物理性质	6
1.4.1	1.4.1 流体的基本特征	6
1.4.2	1.4.2 流体的密度	7
1.4.3	1.4.3 黏性	9
1.4.4	1.4.4 压缩性和膨胀性	13
1.4.5	1.4.5 表面张力	16
习题1	习题1	18
2	2 流体静力学	20
2.1	2.1 流体静压强及其特性	20
2.1.1	2.1.1 流体静压强	20
2.1.2	2.1.2 流体静压强的特性	21
2.2	2.2 流体的平衡微分方程	22
2.2.1	2.2.1 流体平衡微分方程	22
2.2.2	2.2.2 流体平衡微分方程的积分	23
2.2.3	2.2.3 等压面	24
2.3	2.3 流体静力学基本方程	24
2.3.1	2.3.1 静止液体中的压强分布规律	24
2.3.2	2.3.2 静止液体中的压强计算和等压面	25
2.3.3	2.3.3 绝对压强、相对压强和真空度	26
2.3.4	2.3.4 流体静力学基本方程的几何意义与能量意义	27



2.4 测压仪表、液体的相对平衡	28
2.4.1 静压强的单位	28
2.4.2 测压仪表	29
2.5 静止液体作用在壁面上的总压力	32
2.5.1 作用在平面壁上的总压力	33
2.5.2 作用在曲面壁上的总压力	36
习题 2	39
<b>3 流体动力学基础</b>	<b>42</b>
3.1 流体运动要素及研究流体运动的方法	42
3.1.1 流体运动要素	42
3.1.2 研究流体运动的两种方法	42
3.2 流体流动的一些基本概念	44
3.2.1 定常流动和非定常流动	44
3.2.2 流线与迹线	44
3.2.3 流管、流束与总流	46
3.2.4 过水断面、流量及流速	47
3.3 流体流动的连续性方程	48
3.3.1 直角坐标系中的连续性方程	48
3.3.2 微元流束的连续性方程	49
3.3.3 总流的连续性方程	49
3.4 理想流体的运动微分方程及伯努利积分	51
3.4.1 理想流体的运动微分方程	51
3.4.2 理想流体运动微分方程的伯努利积分	51
3.5 理想流体微元流束的伯努利方程	52
3.5.1 质量力只有重力	53
3.5.2 质量力为重力与离心力共同作用	53
3.6 实际流体的伯努利方程及其工程应用	54
3.6.1 实际流体运动的微分方程	54
3.6.2 实际流体微元流束的伯努利方程	55
3.6.3 实际流体总流的伯努利方程	56
3.6.4 伯努利方程的应用	59
3.7 伯努利方程式的意义	60
3.7.1 物理意义(能量意义)	60
3.7.2 几何意义	61
3.8 定常流动总流的动量方程及其工程应用	62
3.8.1 定常流动总流的动量方程	62
3.8.2 动量方程的应用	63
习题 3	65

<b>4 流体的流动阻力计算</b> .....	69
4.1 流体运动与流动阻力.....	69
4.1.1 过水断面上影响流动阻力的主要因素.....	69
4.1.2 流体运动与流动阻力的两种形式.....	69
4.2 流体运动的两种状态.....	70
4.2.1 雷诺实验.....	70
4.2.2 流动状态与水头损失的关系.....	71
4.2.3 流动状态判别准则——雷诺数.....	72
4.3 流体在圆管中的层流运动.....	73
4.3.1 分析层流运动的两种方法.....	73
4.3.2 圆管层流中的速度分布规律.....	75
4.3.3 圆管层流中切应力分布.....	75
4.3.4 圆管层流中的流量和平均速度.....	76
4.3.5 圆管层流中的沿程损失.....	76
4.3.6 层流起始段.....	77
4.4 流体在圆管中的湍流运动.....	78
4.4.1 湍流的特征.....	78
4.4.2 湍流运动要素的时均化.....	78
4.4.3 湍流中的摩擦阻力.....	79
4.4.4 湍流运动中的速度分布.....	80
4.4.5 湍流核心与层流底层.....	80
4.4.6 水力光滑管和水力粗糙管.....	81
4.4.7 圆管湍流中的水头损失.....	81
4.5 沿程阻力系数的确定.....	82
4.5.1 尼古拉兹实验.....	82
4.5.2 计算 $\lambda$ 的经验或半经验公式.....	83
4.5.3 莫迪图.....	84
4.6 非圆形截面均匀湍流的阻力计算.....	87
4.6.1 利用原有公式计算.....	87
4.6.2 用蔡西公式计算.....	88
4.7 边界层理论基础.....	89
4.7.1 边界层的基本概念.....	89
4.7.2 边界层分离.....	89
4.8 管路中的局部损失.....	91
4.8.1 圆管突然扩大处的局部损失.....	91
4.8.2 局部损失计算的一般公式.....	92
4.8.3 能量损失叠加原则.....	95
习题4.....	96

5 有压管流与孔口、管嘴出流 .....	99
5.1 简单管路的水力计算 .....	99
5.1.1 短管的水力计算 .....	99
5.1.2 长管的水力计算 .....	100
5.2 管网的水力计算基础 .....	103
5.2.1 串联管路 .....	103
5.2.2 并联管路 .....	104
5.2.3 连续均匀出流管路 .....	105
5.2.4 管网的类型及水力计算 .....	105
5.3 孔口出流 .....	108
5.3.1 薄壁小孔口定常出流 .....	108
5.3.2 大孔口定常自由出流 .....	110
5.3.3 孔口非定常出流 .....	110
5.4 管嘴出流 .....	111
5.4.1 圆柱形外管嘴定常出流 .....	111
5.4.2 管嘴的真空度与使用条件 .....	112
5.4.3 其他形状的管嘴出流 .....	114
习题 5 .....	115
6 渗流力学基础 .....	119
6.1 渗流基本概念 .....	119
6.1.1 渗流和渗流力学 .....	119
6.1.2 多孔介质及孔隙性 .....	119
6.1.3 多孔介质的压缩性 .....	121
6.2 渗流基本定律 .....	121
6.2.1 达西定律及渗透率 .....	122
6.2.2 达西定律的理论基础 .....	123
6.2.3 达西定律适用范围 .....	124
6.2.4 渗透率或渗透系数的确定 .....	124
6.3 单相液体渗流 .....	126
6.3.1 渗流数学模型的建立 .....	126
6.3.2 稳态渗流数学模型的解 .....	130
6.3.3 非稳态渗流数学模型描述 .....	134
6.4 两相渗流基本知识 .....	134
6.4.1 流体饱和度 .....	134
6.4.2 相对渗透率 .....	135
习题 6 .....	136



<b>7 流体机械之泵与风机</b> .....	137
<b>7.1 离心式泵</b> .....	137
7.1.1 离心式泵的构造与工作原理 .....	137
7.1.2 泵的扬程 .....	138
7.1.3 叶轮 .....	141
7.1.4 泵中的能量损失 .....	141
7.1.5 泵的吸上扬程与气蚀现象 .....	143
7.1.6 离心式泵的性能曲线 .....	146
7.1.7 泵在管路中的工况点 .....	147
7.1.8 离心式泵的选择 .....	148
<b>7.2 离心式通风机</b> .....	148
7.2.1 通风机的风压、风量和效率 .....	148
7.2.2 离心式风机的性能与工况 .....	151
7.2.3 离心式通风机的选择 .....	151
<b>7.3 轴流式通风机</b> .....	152
7.3.1 轴流式通风机的构造和工作原理 .....	152
7.3.2 轴流式压气机 .....	154
习题 7 .....	155
<b>8 相似原理与量纲分析</b> .....	156
<b>8.1 相似原理</b> .....	156
8.1.1 力学相似的基本概念 .....	156
8.1.2 相似准则 .....	158
8.1.3 近似模型法 .....	160
<b>8.2 量纲分析及其应用</b> .....	163
8.2.1 量纲分析 .....	163
8.2.2 量纲分析法的应用 .....	165
习题 8 .....	167
<b>9 大气污染扩散基础及应用</b> .....	170
<b>9.1 气体污染物的扩散及控制</b> .....	170
9.1.1 湍流扩散的基本理论 .....	170
9.1.2 大气扩散模式 .....	171
9.1.3 气体污染物的控制策略 .....	175
<b>9.2 大气环境预测</b> .....	175
9.2.1 大气环境的概念 .....	175
9.2.2 大气环境预测的意义 .....	176
9.2.3 运用流体力学软件对大气环境进行预测 .....	176

习题 9 .....	180
<b>10 海洋石油污染运移分析及控制</b> .....	181
10.1 海洋石油污染现状及危害 .....	181
10.1.1 海洋石油污染的现状 .....	181
10.1.2 海洋石油污染的原因 .....	182
10.1.3 海洋石油污染的危害 .....	182
10.2 石油在海洋中的迁移与转化规律 .....	183
10.2.1 溢油的迁移转化过程 .....	183
10.2.2 溢油风化过程的综合作用 .....	186
10.3 海洋石油污染物扩散运移特征研究 .....	186
10.3.1 平滑海岸线特征 .....	186
10.3.2 海洋溢油模型建立 .....	187
10.3.3 海洋石油污染物扩散运移模拟结果及分析 .....	187
习题 10 .....	193
<b>11 CO<sub>2</sub> 封存流动理论基础及应用</b> .....	194
11.1 CCS 技术现状和概况 .....	194
11.1.1 CO <sub>2</sub> 地质封存 .....	194
11.1.2 CO <sub>2</sub> -EOR 和 CO <sub>2</sub> -ECBM 技术 .....	196
11.1.3 CO <sub>2</sub> 海洋封存概述 .....	197
11.2 地下咸水层 CO <sub>2</sub> 封存数学模型的建立及求解 .....	197
11.2.1 CO <sub>2</sub> -盐水两相驱替模型 .....	197
11.2.2 CO <sub>2</sub> -盐水两相驱替数学模型建立 .....	199
11.2.3 CO <sub>2</sub> -咸水两相驱替界面移动 .....	201
11.2.4 波及效率及其影响因素 .....	204
11.3 CO <sub>2</sub> 封存量评价 .....	208
11.3.1 封存量的概念划分 .....	208
11.3.2 CO <sub>2</sub> 封存量估算 .....	209
11.4 CO <sub>2</sub> 封存量的风险 .....	211
11.4.1 CO <sub>2</sub> 封存的环境风险 .....	211
11.4.2 CO <sub>2</sub> 地质封存的泄漏风险 .....	212
11.4.3 CO <sub>2</sub> 泄漏的环境影响 .....	212
习题 11 .....	215
习题答案 .....	216
参考文献 .....	220

# 1

## 绪论

### 1.1 流体力学的概念与发展简史

#### 1.1.1 流体力学概念

流体力学是研究流体平衡及其运动规律的一门学科，是力学的一个重要分支。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体，所以流体力学是与人类日常生活和生产事业密切相关的。流体力学的研究对象包括液体和气体，它们统称为流体。我们在工程流体力学中主要是研究流体中大量分子的宏观平均运动规律，而忽略对其具体分子运动的研究。

流体力学在研究流体平衡和机械运动规律时，要应用物理学及理论力学中有关物理平衡及运动规律的原理，如力系平衡定理、动量定理、动能定理，等等。因为流体在平衡或运动状态下，也同样遵循这些普遍的原理，所以物理学和理论力学的知识是学习流体力学课程必要的基础。

在实际工程中，如环境工程、水利工程、动力工程、航空工程、化学工程、机械工程、石油天然气工程等诸多领域流体力学都起着十分重要的作用。

#### 1.1.2 流体力学的发展历史

流体力学的萌芽，是自距今约 2200 年以前，西西里岛的希腊学者阿基米德写的“论浮体”一文开始的。他对静止时的液体力学性质做了第一次科学总结。

流体力学的主要发展是从牛顿时代开始的，1687 年牛顿在名著《自然哲学的数学原理》中讨论了流体的阻力、波浪运动等内容，使流体力学开始成为力学中的一个独立分支。此后，流体力学的发展主要经历了三个阶段：

第一阶段：伯努利所提出的液体运动的能量估计及欧拉所提出的液体运动的解析方法，为研究液体运动的规律奠定了理论基础，从而在此基础上形成了一门属于数学的古典“水动力学”（或古典“流体力学”）。

第二阶段：在古典“水动力学”的基础上纳维和斯托克斯提出了著名的实际黏性流体的基本运动方程——纳维-斯托克斯方程（N-S 方程），从而为流体力学的长远发展奠定了理论基础。但由于其所用数学的复杂性和理想流体模型的局限性，不能满意地解决工程问题，故形成了以实验方法来制定经验公式的“实验流体力学”。但由于有些经验公式缺乏理论基础，使其应用范围狭窄，且无法继续发展。

第三阶段：从 19 世纪末起，人们将理论分析方法和实验分析方法相结合，以解决实际问题，同时古典流体力学和实验流体力学的内容也不断更新变化，如提出了相似理论和

量纲分析,边界层理论和湍流理论等,在此基础上,最终形成了理论与实践并重的研究实际流体模型的现代流体力学。在20世纪60年代以后,由于计算机的发展与普及,流体力学的应用更是日益广泛。

流体力学是在人类同自然界作斗争和在生产实践中逐步发展起来的。在我国,利用流体力学原理开展的水利事业的历史十分悠久:

4000多年前的“大禹治水”的故事——顺水之性,治水须引导和疏通。

秦朝在公元前256~公元前210年修建了我国历史上的三大水利工程(都江堰、郑国渠、灵渠)——明渠水流、堰流。

古代的计时工具“铜壶滴漏”——孔口出流。

隋朝(公元587~610年)完成的南北大运河。

隋朝(公元605~617年)工匠李春在冀中洺河修建的赵州石拱桥——拱背的4个小拱,既减压主拱的负载,又可宣泄洪水。

清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

### 1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学按其研究内容的侧重点不同,分为理论流体力学和工程流体力学。其中理论流体力学主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性,工程流体力学侧重于解决工程实际中出现的问题,而不追求数学上的严密性。当然由于流体力学研究的复杂性,在一定程度上,两种方法都必须借助于实验研究,得出经验或半经验的公式。因此我们研究流体力学问题时也要从理论、实验和数值这三个方面开展。

#### 1.1.3.1 理论研究方法

理论研究方法是根据流体运动的普遍规律如质量守恒、动量守恒、能量守恒等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。理论分析的关键步骤是建立“理想力学模型”,即针对实际流体的力学问题,分析其中的各种矛盾并抓住主要方面,对问题进行简化而建立反映问题本质的“力学模型”。流体力学中最常用的基本模型有:连续介质、牛顿流体、不可压缩流体、理想流体、平面流动等。不过由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。这种方法简单实用,即便在计算机高度发达的今天,仍然适用。

理论研究方法的关键在于提出理论模型,并能运用数学方法求出理论结果,达到揭示液体运动规律的目的。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。因此亦采用数理分析法求解,即总流分析方法与代数方程为主的求解方法:理论公式+经验系数,经验公式,二维微分方程,基础流体力学(应用流体力学)、水力学。

#### 1.1.3.2 实验研究方法

实验研究方法主要包括两个方面,即现场观测和实验室模拟。

(1) 现场观测是对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象,利用各种仪器进行系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。过去对天气的观测和预报,基本上就是这样进行的。

(2) 不过现场流动现象的发生往往不能控制,发生条件几乎不可能完全重复出现,



影响到对流动现象和规律的研究；现场观测还要花费大量物力、财力和人力。因此，人们建立实验室，使这些现象能在可以控制的条件下出现，以便于观察和研究。

同物理学、化学等学科一样，流体力学离不开实验，尤其是对新的流体运动现象的研究。实验能显示运动特点及其主要趋势，有助于形成概念，检验理论的正确性。200年来流体力学发展史中每一项重大进展都离不开实验。

模型实验在流体力学中占有重要地位。这里所说的模型是指根据理论指导，把研究对象尺度改变（放大或缩小）以便能安排实验。有些流动现象难以靠理论计算解决，有的则不可能做原型实验（成本太高或规模太大）。这时，根据模型实验所得的数据可以用像换算单位制那样的简单算法求出原型的数据。

现场观测常常是对已有事物、已有工程的观测，而实验室模拟却可以对还没有出现的事物、没有发生的现象（如待设计的工程、机械等）进行观察，使之得到改进。因此，实验室模拟是研究流体力学的重要方法。

### 1.1.3.3 数值研究方法

数学的发展，计算机的不断进步，以及流体力学各种计算方法的发明，使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性。数值方法就是在计算机应用的基础上，采用各种离散化方法（有限差分法、有限元法等），建立各种数值模型，通过计算机进行数值计算和数值实验，得到在时间和空间上许多数字组成的集合体，最终获得定量描述流场的数值解。

数值模拟和实验模拟相互配合，使科学技术的研究和工程设计的速度加快，并节省开支。数值计算方法最近发展很快，其重要性与日俱增。近二三十年来，这一方法得到很大发展，已形成专门学科——计算流体力学。

## 1.2 流体的连续介质模型

### 1.2.1 流体质点的概念

流体是由分子构成的，根据热力学理论，这些分子在不断地随机运动和相互碰撞着。因此，到分子水平这一层，流体之间就总是存在间隙，其质量在空间的分布是不连续的，其运动在时间和空间上都是不连续的。而到亚分子的层次，如原子核和电子，流体同样是不连续的。

但是，在流体力学及与之相关的科学领域中，人们感兴趣的往往不是个别分子的运动，而是大量分子的一些平均统计特性，如密度、压力和温度等。确定物质物理量的分子统计平均方法可以用来建立流体质点的概念，现在以密度为例说明如下。

在流体中任意取一体积为  $\Delta V$  的微元，其质量为  $\Delta m$ ，则其平均密度可表示为：

$$\rho_m = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1)$$

显然，为了精确刻画不同空间点的密度， $\Delta V$  应该取得尽量的小，但是， $\Delta V$  的最小值又必须有一定限度，超过这一限度，分子的随机进出将显著影响微元体的质量，使密度成为不确定的随机值。因此，两者兼顾，用于描述物理量平均统计特性的微元  $\Delta V$  应该是使



物理量统计平均值与分子随机运动无关的最小微元  $\Delta V_i$ ，并将该微元定义为流体质点，该微元的平均密度就定义为流体质点的密度：

$$\rho_m = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_i} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

在一般关于流体运动的工程和科学问题中，将描述流体运动的空间尺度精确到  $0.01\text{mm}$  的数量级，就能够满足对精度的要求。在三维空间的情况下，这个尺度相当于  $10^{-6}\text{mm}^3$ 。对于一般工程问题（除稀薄气体情况），如果令  $\Delta V_i = 10^{-6}\text{mm}^3$ ，则其中所包含的分子数量就足以使其统计平均物理量与个别分子的运动无关。但另一方面，在一般精度要求范围内， $\Delta V_i$  的几何尺寸又可忽略不计。因此，对于一般工程问题，完全可将流体视为有连续分布的质点构成，而流体质点的物理性质及其运动参数就作为研究流体整体运动的出发点，并由此建立起所谓流体的连续介质模型。

### 1.2.2 流体的连续介质模型

基于流体质点的概念，流体的连续介质模型有如下的基本假设。

质量分布连续：用密度作为表示流体质量的物理量，则密度是空间坐标和时间的单值的连续可微函数，即：

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (1-3)$$

连续运动：在取定的区域和时间内，质量连续分布的流体处于运动状态时，其各个部分不会彼此分裂，也不相互穿插，即运动是连续的。以流体运动速度为例，流体运动连续，则速度是空间坐标点和时间的单值的连续可微函数，即：

$$v = v(x, y, z, t) \quad (1-4)$$

内应力连续：流体运动时，流体质点之间的相互作用力称之为流体内应力。在流体中任意取一个微元面积  $\Delta A$ ，微元面上流体质点之间的相互作用力为  $\Delta F$ ，则流体内应力  $P$  可以定义为：

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad (1-5)$$

与流体质量和速度一样，流体内应力也是连续的，即为空间坐标和时间的单值的连续可微函数：

$$P = P(x, y, z, t) \quad (1-6)$$

上述流体连续介质基本假说具有重要的意义。流体流动和运动参数物理量被表示成连续函数，意味着大量的数学方法特别是微分方程可以被引用到流体力学中来。这为流体力学的研究带来了极大的方便。流体的连续介质模型假说在除了稀薄空气和激波等少数情况外的大多数场合都是适用的。

## 1.3 量纲和单位

对物理问题的认识，最简单的是比较物理量的大小，显然只有对具有同样属性的物理量才能比较它们的大小。进一步是了解物理问题中的因果关系。作为原因的诸多物理量之间，总会以一种有机的联系来反映作为结果的物理量。讨论这种联系首先要明白诸量的属

性或量纲，特别是作为结果的物理量的量纲，必须与作为原因的诸多物理量的量纲之间，建立反映该问题物理本质的固有联系。

在认识物理问题的规律中离不开对物理量的度量。度量某一个物理量，需要以一定方式将该量与一个取作单位的同类量相比较。如在力学问题中常采用 cm、g、s 分别作为度量长度量、质量量和时间量的单位，并称为物理单位制。但用物理单位制讨论和研究物理问题时很不方便。最本质的办法是选用本问题中能够反映问题特征的物理量来作单位。一般，在物理问题的因果关系中，特别是在作为原因的自变量中选择某几个具有独立量纲的自变量作单位，组成单位系，用来度量该问题中所有的物理量。如在运动学问题中可选用一个特征长度和一个特征时间组成单位系；在动力学的问题中，则除了选用一个特征长度、一个特征时间外，还要选用一个特征质量或特征力，三者组成单位系。

量纲是表征物理量的性质（类别），如时间、长度、质量等；单位是表征物理量大小或数量的标准，如 s、m、kg 等。

### 1.3.1 量纲

量纲 (Physical Dimension) 是指物理量的基本属性。物理学的研究可以定量地描述各种物理现象，描述中所采用的各类物理量之间有着密切的关系，即它们之间具有确定的函数关系。为了准确地描述这些关系，物理量可分为基本量和导出量，一切导出量均可从基本量中导出，由此建立了整个物理量之间函数关系，这种关系通常称为量制。以给定量制中基本量量纲的幂的乘积表示某量量纲的表达式，称为量纲式或量纲积。它定性地表达了导出量与基本量的关系，对于基本量而言，其量纲为其自身。在物理学发展的历史上，先后曾建立过各种不同的量制：CGS 量制、静电量制、高斯量制等。1971 年后，国际上普遍采用了国际单位制（简称 SI），选定了由 7 个基本量构成的量制，导出量均可用这 7 个基本量导出。7 个基本量的量纲分别用长度 L、质量 M、时间 T、电流 I、温度  $\Theta$ 、物质的量 N 和光强度 J 表示，则任一个导出量的量纲：

$$\dim A = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (1)$$

这是量纲的通式。式中的指数  $\alpha, \beta, \gamma, \dots, \eta$  称为量纲指数，全部指数均为零的物理量，称为无量纲量，如精细结构常数即为无量纲量。此外，如速度的量纲  $\dim V = LT^{-1}$ ，加速度 a 的量纲  $\dim a = LT^{-2}$  等。

### 1.3.2 单位

物理量之间通过各种物理定律和有关的定义彼此建立联系。人们往往取其中的一些作为基本物理量，以它们的单位作为基本单位，形成配套的单位体系，其他的单位可以由此推出，这就是单位制。

由于历史的原因，世界各国一直通过有各种不同的单位体制，混乱复杂。不同行业采用的单位也不尽相同，为了便于国际间进行工业技术的交流，1875 年在签署米制公约时，规定以米为长度单位，以千克为质量单位，以秒为时间单位。这就是众所周知的米-千克-秒 (MKS) 单位制。目前，国际单位制的 7 种基本单位如表 1-1 所示。

表 1-1 国际基本单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	$L$	米	m
质量	$m$	千克(公斤)	kg
时间	$t$	秒	s
电流	$I$	安(安培)	A
热力学温度	$T$	开(开尔文)	K
物质的量	$n(\nu)$	摩(摩尔)	mol
发光强度	$I(Iv)$	坎(坎德拉)	cd

## 1.4 流体的主要物理性质

### 1.4.1 流体的基本特征

#### 1.4.1.1 流体的概念

流体,是与固体相对应的一种物体形态,是液体和气体的总称。由大量的、不断地做热运动而且无固定平衡位置的分子构成,它的基本特征是没有固定的形状并且具有流动性。与固体相比,流体只能承受压力,一般不能承受拉力与抵抗拉伸变形。

其中,液体和气体的区别如下:

- (1) 气体易于压缩;而液体难于压缩。
- (2) 液体有一定的体积,存在一个自由液面;气体能充满任意形状的容器,无一定的体积,不存在自由液面。

#### 1.4.1.2 流体的分类

(1) 根据流体受压体积缩小的性质,流体可分为:

可压缩流体(Compressible Flow): 流体密度随压强变化不能忽略的流体( $\rho \neq \text{const}$ )。

不可压缩流体(Incompressible Flow): 流体密度随压强变化很小,流体的密度可视为常数的流体( $\rho = \text{const}$ )。

注:

- 1) 严格地说,不存在完全不可压缩的流体。
- 2) 一般情况下的液体都可视为不可压缩流体(发生水击时除外)。
- 3) 对于气体,当所受压强变化相对较小时,可视为不可压缩流体。
- 4) 管路中压降较大时,应作为可压缩流体。

(2) 根据流体是否具有黏性,可分为:

实际流体:指具有黏度的流体,在运动时具有抵抗剪切变形的能力,即存在摩擦力,黏度 $\mu \neq 0$ 。

理想流体:是指忽略黏性( $\mu=0$ )的流体,在运动时也不能抵抗剪切变形。

### 1.4.2 流体的密度

流体所包含的物质的量称为流体的质量，流体具有质量并受重力作用。根据牛顿第二运动定律，流体的质量  $G$  等于流体的质量  $m$  与重力加速度  $g$  的乘积，即：

$$G = mg \quad (1-7)$$

式中， $G$ 、 $m$ 、 $g$  的单位分别为 N(牛)，kg(千克)， $m/s^2$  (米/秒<sup>2</sup>)。流体的质量不因流体所在位置不同而改变。但重力加速度却因位置差异而有不同之值，在中纬度附近约为  $9.806m/s^2$ 。因此，质量相同的流体在不同的地方可能有不同的质量。

如图 1-1 所示，在流体中任取一个流体微团  $A$ ，其微元体积为  $\Delta V$ ，微元质量为  $\Delta m$ 。当微元无限小而趋近  $P(x, y, z)$  点成为一个流体质点时，定义：

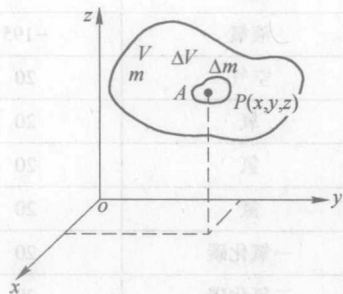


图 1-1 流体微团

流体的密度  $\rho$  为：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-8)$$

如果流体是均质的，则：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-9)$$

密度  $\rho$  在国际单位制中，量纲为  $[ML^{-3}]$ ，单位为  $kg/m^3$  (千克/米<sup>3</sup>)， $g/cm^3$  (克/厘米<sup>3</sup>) 等。

不同流体的密度各不相同，同一种流体的密度则随温度和压强而变化。各种常见流体在一个标准大气压下的密度值见表 1-2，水在一个标准大气压而温度不同时的密度值见表 1-3。

表 1-2 1 标准大气压下常见流体的物理性质

流体名称	温度/°C	密度/ $kg \cdot m^{-3}$	动力黏度 $\mu$ / $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$	运动黏度 $\nu$ / $m^2 \cdot s^{-1}$
蒸馏水	4	1000	$1.52 \times 10^{-3}$	$1.52 \times 10^{-6}$
海水	20	1025	$1.08 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-6}$
四氯化碳	20	1588	$0.97 \times 10^{-3}$	$0.61 \times 10^{-6}$
汽油	20	678	$0.29 \times 10^{-3}$	$0.43 \times 10^{-6}$
石油	20	856	$7.2 \times 10^{-3}$	$8.4 \times 10^{-6}$
润滑油	20	918	$440 \times 10^{-3}$	$479 \times 10^{-6}$
煤油	20	808	$1.92 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-6}$
酒精(乙醇)	20	789	$1.19 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-6}$
甘油	20	1258	$1490 \times 10^{-3}$	$1184 \times 10^{-6}$
松节油	20	862	$1.49 \times 10^{-3}$	$1.73 \times 10^{-6}$
蓖麻油	20	960	$0.961 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-6}$