



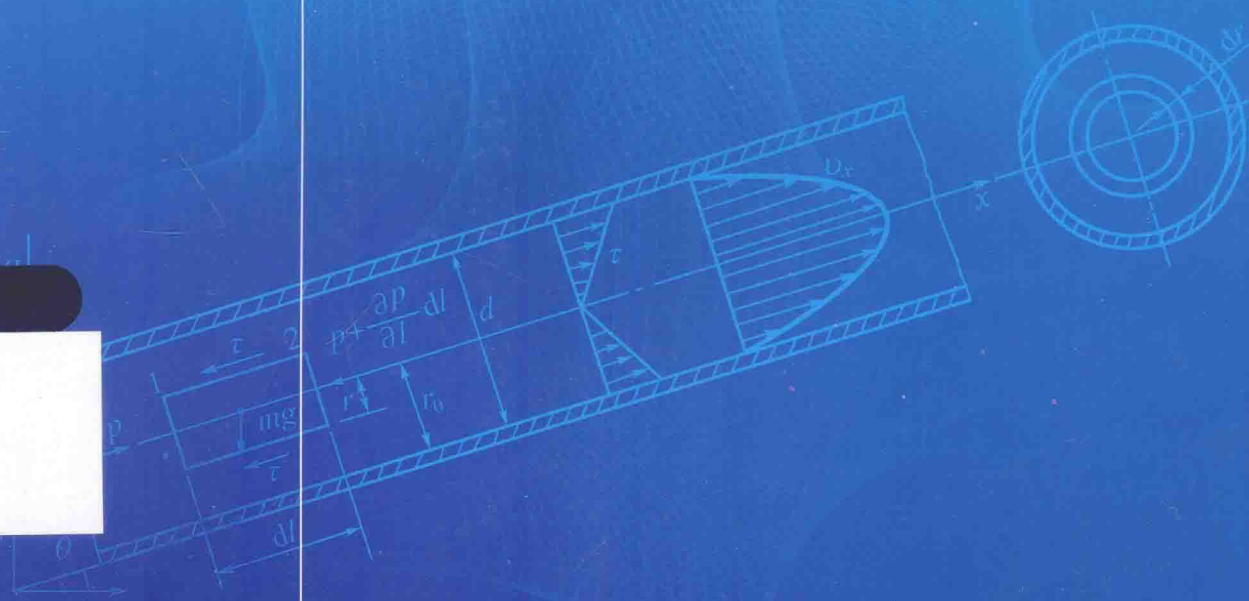
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等学校理工科力学类规划教材

# 工程流体力学

(第五版)

ENGINEERING FLUID MECHANICS

刘宏升 孙文策 主编



大连理工大学出版社  
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等学校理工科力学类规划教材

# 工程流体力学

(第五版)

ENGINEERING FLUID MECHANICS

主编 刘宏升 孙文策

编著 刘宏升 孙文策 李元明

周美 刘超 邢殿录



大连理工大学出版社

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 刘宏升, 孙文策主编. —5 版. —  
大连: 大连理工大学出版社, 2015. 9  
ISBN 978-7-5685-0075-3

I. ①工… II. ①刘… ②孙… 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(2015)第 194020 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 传真: 0411-84701466 邮购: 0411-84703636

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连业发印刷有限公司印刷

大连理工大学出版社发行

---

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 16.75 字数: 403 千字  
1995 年 12 月第 1 版 2015 年 9 月第 5 版

2015 年 9 月第 1 次印刷

---

责任编辑: 于建辉

责任校对: 许 蕾

封面设计: 季 强

---

ISBN 978-7-5685-0075-3

定价: 32.00 元

# 前 言

工程流体力学研究流体的宏观运动规律,通过求解流体运动的基本方程,研究流体的力学规律及流体与固体壁面之间的相互作用,同时解决工程中出现的实际流动问题,具有理论性强与工程应用广泛的双重特点。作为多个工程类专业的学科基础课程,工程流体力学以通识教育为基础,同时又服务于专业课程,在普通高校的教学中具有承前启后的重要作用。

本书自 1995 年 12 月出版以来,在历次修订中注意保持及突出以下特色:

(1) 兼顾能源动力、机械、船舶等相关专业的教学需要,选入的内容主要是各相关专业的流体力学基础性理论,对于专业性较强的内容,选入较少。

(2) 章节的安排由简单到复杂,由一般到特殊,力求深入浅出,符合认识的渐进性。

(3) 不仅注重培养学生运用流体力学的三种基本分析方法(控制体分析法、微分分析法和量纲分析法)解决问题的能力,而且注重与高等数学、大学物理等先行课程的联系,尽量避免不必要的重复。

(4) 书中配有较多的例题、习题,在阐述理论和选用例题、习题时,与工程实际相结合,在讲授传统经典知识的同时,又与工程实际的新成果、新知识有效结合,兼顾了知识的继承性与先进性。

本次修订依据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 2008 年 10 月公布的《工程流体力学课程教学基本要求》(能源动力类),并结合相关专业教学改革和人才培养的需求进行。在保留原书特色的基础上,重点做了如下工作:

(1) 修改了对一些概念和理论的论述,以便更准确地理解和掌握流体力学的基本原理。

(2) 对知识体系进行重新梳理,如将湍流速度分布按照水力光滑管、水力粗糙管、速度的指数分布规律三个层面,对边界层分离的原因、结果分布进行了明确的说明,使本书的条理更为清晰。

(3) 按照热工基础类课程(热力学、传热学、流体力学)一体化建设的思路,对热力学与流体力学课程的重叠内容(如开口系统能量方程、能量损失、喷管流动特性等)进行调整,合理组织避免重复;同时对传热学课程所用的量纲分析法、量级分析法进行了必要的补充,为后续传热学课程的教学做好铺垫,以便形成教学内容能够合理衔接的专业基础课程体系。

(4) 缩减了部分复杂的推导过程,如删除了气体动力学的激波前后马赫数关系式的推导、激波熵增公式的推导,以及部分冗余的例题,使该部分内容更为简明。

(5) 增加和调整了部分例题、习题,特别是在各章增加了思考题以及一些与工程实际紧密结合的题目,以提高学生解决实际工程问题的能力。

参加本书第1~4版编写工作的有:孙文策、刘宏升、周美、邢殿录(大连理工大学),刘超(大连海事大学),李元明(东北大学)。孙文策教授负责全书的统稿。大连理工大学解茂昭教授担任主审。高等学校工科水力学及工程流体力学课程指导小组组长李鉴初教授对本书第1版提出了宝贵的意见。许多学校的同行在使用本书的过程中也提出了一些建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。

第5版修订工作由刘宏升完成。解茂昭教授担任主审。

本书可作为热能、动力、船舶、机械等专业本科生工程流体力学(50~70学时)的教材。

限于我们的水平,修改后的教材仍可能存在一些谬误和不妥之处,恳请读者批评指正。

您有任何意见或建议,请通过以下方式与大连理工大学出版社联系:

电话:0411-84708947

邮箱:jcjf@dutp.cn

编者

2015年8月

## 主要符号表

$A$ 面积	$l$ 长度	$W$ 功,重力
$a$ 加速度,角加速度	$M$ 质量,力矩	$We$ 韦伯数
$B$ 任意物理参数	$m$ 质量	$\alpha$ 夹角
$c$ 声速	$Ma$ 马赫数	$\alpha_v$ 膨胀系数
$C_D$ 阻力系数	$N$ 任意物理量	$\beta$ 夹角
$C_f$ 摩擦阻力系数	$n$ 转速	$z$ 速度环量
$C_L$ 升力系数	$\mathbf{n}$ 法向单位矢量	$\gamma$ 容重,剪变形角速度
$C_p$ 压强系数	$P$ 功率	$\delta$ 边界层厚度
$c_p$ 定压比热容	$P_p$ 压力功率	$\varepsilon$ 绝对粗糙度,线变形速度
$D$ 直径	$P_s$ 轴功率	$\zeta$ 局部损失系数
$d$ 直径	$p$ 压强	$\eta$ 单位体积的任意物理量
$Eu$ 欧拉数	$p_a$ 大气压强	$\theta$ 角度
$F$ 力,合力	$p_b$ 背压	$K$ 体积模量
$f$ 单位质量力	$p_c$ 表压强	$k$ 压缩系数
$F_D$ 阻力	$Q$ 热量	$\lambda$ 沿程损失系数
$F_f$ 质量力	$q_m$ 质量流量	$\mu$ 动力黏度
$F_L$ 升力	$q_v$ 体积流量	$\nu$ 运动黏度
$Fr$ 弗劳德数	$R$ 半径	$\pi$ 圆周率,无量纲量
$F_s$ 表面力	$r$ 半径	$\rho$ 密度
$f_s$ 应力	$Re$ 雷诺数	$\rho_l$ 流体的密度
$g$ 重力加速度	$s$ 比熵	$\rho_w$ 4 °C 水的密度
$H$ 高度	$T$ 温度	$\sigma$ 表面张力,正压力
$h$ 高度,比焓	$U$ 质量力势	$\tau$ 切应力
$h_l$ 沿程损失	$u$ 比内能	$\Phi$ 传热率
$h_j$ 局部损失	$V$ 体积	$\varphi$ 速度势
$h_s$ 单位重力流体由机器得到的功	$v$ 速度,平均速度,比容	$\chi$ 湿周
$h_w$ 管道总损失	$v_a$ 平均速度	$\psi$ 流函数
$J$ 涡通量,旋涡强度	$v_c$ 牵连速度	$\omega$ 旋转角速度
$k$ 相似比例系数	$v_n$ 法向速度	
$L$ 长度,混合长度	$v_r$ 相对速度	

# 目 录

## 第 0 章 序 言 / 1

## 第 1 章 流体的主要物理性质 / 3

### 1.1 流体的特征及连续介质模型 / 3

#### 1.1.1 流体的特征 / 3

#### 1.1.2 连续介质模型 / 4

### 1.2 流体密度的相关概念 / 4

#### 1.2.1 流体的密度 / 4

#### 1.2.2 流体的相对密度 / 5

#### 1.2.3 流体的比容 / 5

#### 1.2.4 混合气体的密度 / 5

#### 1.2.5 流体的容重 / 6

### 1.3 流体的压缩性和膨胀性 / 6

#### 1.3.1 流体的压缩性 / 6

#### 1.3.2 流体的膨胀性 / 7

#### 1.3.3 可压缩流体和不可压缩流体 / 7

### 1.4 作用在流体上的力 / 9

#### 1.4.1 质量力 / 9

#### 1.4.2 表面力 / 9

### 1.5 流体的黏性 / 10

#### 1.5.1 黏性的概念及黏性内摩擦力产生的原因 / 10

#### 1.5.2 牛顿内摩擦定律 / 11

#### 1.5.3 流体的黏度与温度和压强的关系 / 13

#### 1.5.4 牛顿流体与非牛顿流体 / 15

#### 1.5.5 黏性流体和理想流体 / 16

### 1.6 表面张力和毛细现象 / 16

#### 思考题 / 18

#### 习 题 / 18

## 第 2 章 流体静力学 / 21

### 2.1 静止流体的压强特点 / 21

### 2.2 静止流体平衡方程 / 22

### 2.3 重力场中静止流体内部的压强 / 23

#### 2.3.1 不可压缩流体 / 23

#### 2.3.2 标准大气 / 24

### 2.4 非惯性坐标系中的静止液体 / 26

#### 2.4.1 等加速度直线运动中的相对静止液体 / 26

#### 2.4.2 等角速度旋转运动中的相对静止液体 / 27

### 2.5 静止液体对平板的作用力 / 30

#### 2.5.1 作用力的大小 / 30

#### 2.5.2 力的作用点 / 31

### 2.6 静止液体对曲面的作用力 / 32

### 2.7 浮 力 / 34

#### 2.7.1 浮力基本定律 / 34

#### 2.7.2 液体比重计 / 35

### 2.8 流体静压强的测量 / 35

#### 2.8.1 U形管测压计 / 35

#### 2.8.2 多管测压计 / 36

#### 2.8.3 微压计 / 36

#### 思考题 / 37

#### 习 题 / 37

## 第 3 章 流体流动的基本方程 / 42

### 3.1 描述流体运动的两种方法 / 42

#### 3.1.1 拉格朗日方法 / 42

- 3.1.2 欧拉方法 / 43
- 3.1.3 质点导数 / 44
- 3.2 描述流体运动的一些基本概念 / 45
  - 3.2.1 流动的分类 / 45
  - 3.2.2 迹线与流线 / 46
  - 3.2.3 流管 / 47
  - 3.2.4 流量 / 47
- 3.3 系统与控制体 / 48
- 3.4 连续方程 / 50
  - 3.4.1 积分形式的连续方程 / 50
  - 3.4.2 微分形式的连续方程 / 53
- 3.5 动量方程 / 55
- 3.6 伯努利方程 / 59
  - 3.6.1 理想流体一维定常流动的运动微分方程 / 59
  - 3.6.2 伯努利方程 / 61
  - 3.6.3 伯努利方程的应用 / 62
- 3.7 动量矩方程 / 67
  - 3.7.1 动量矩方程 / 67
  - 3.7.2 涡轮机械的基本方程 / 70
- 3.8 能量方程 / 71
  - 3.8.1 积分形式的能量方程 / 71
  - 3.8.2 稳定流动的能量方程 / 73
- 3.9 管流能量方程 / 74
  - 3.9.1 能量方程和伯努利方程的比较 / 74
  - 3.9.2 动能修正系数及动量修正系数 / 75
  - 3.9.3 总流伯努利方程 / 76
- 思考题 / 77
- 习题 / 78
- 第4章 旋涡理论和势流理论 / 84**
  - 4.1 流体微团的运动分析 / 84
    - 4.1.1 线变形速度 / 85
    - 4.1.2 剪变形角速度 / 86
    - 4.1.3 平均旋转角速度 / 87
  - 4.2 有旋运动和无旋运动 / 88
    - 4.2.1 圆周运动 / 88
      - 4.2.2 直线运动 / 90
  - 4.3 理想流体运动微分方程 / 91
    - 4.3.1 欧拉运动微分方程 / 91
    - 4.3.2 兰姆运动微分方程 / 93
  - 4.4 欧拉积分和伯努利积分 / 93
    - 4.4.1 欧拉积分 / 94
    - 4.4.2 伯努利积分 / 94
    - 4.4.3 两种积分的物理意义及应用 / 95
  - 4.5 旋涡的基本概念 / 96
    - 4.5.1 涡线、涡管 / 97
    - 4.5.2 旋涡强度(涡通量) / 97
  - 4.6 速度环流和斯托克斯定理 / 98
    - 4.6.1 速度环流 / 98
    - 4.6.2 斯托克斯定理 / 98
  - 4.7 旋涡运动的基本定理 / 101
    - 4.7.1 汤姆逊定理 / 101
    - 4.7.2 亥姆霍兹定理 / 102
  - 4.8 二元旋涡的速度分布和压强分布 / 103
  - 4.9 速度势和流函数 / 105
    - 4.9.1 速度势 / 105
    - 4.9.2 流函数 / 107
    - 4.9.3 速度势和流函数的求解方法 / 109
  - 4.10 几种简单的平面势流及其叠加 / 112
    - 4.10.1 直均流 / 112
    - 4.10.2 源或汇 / 112
    - 4.10.3 点涡 / 113
    - 4.10.4 简单平面势流的叠加 / 114
    - 4.10.5 偶极 / 115
    - 4.10.6 螺旋流 / 116
  - 4.11 直均流绕圆柱体无环流流动 / 117
    - 4.11.1 直均流绕圆柱体流动的速度势 / 117
    - 4.11.2 速度分布 / 119



- 4.11.3 圆柱表面的压强分布 / 119
- 4.11.4 作用在圆柱体上的力 / 121
- 4.12 直均流绕圆柱体有环流流动 / 122
- 思考题 / 124
- 习 题 / 125
- 第 5 章 相似理论与量纲分析 / 128**
  - 5.1 相似概念 / 128
    - 5.1.1 几何相似 / 128
    - 5.1.2 运动相似 / 129
    - 5.1.3 动力相似 / 129
  - 5.2 动力相似准则 / 130
    - 5.2.1 黏性力相似准则 / 131
    - 5.2.2 压力相似准则 / 132
    - 5.2.3 重力相似准则 / 132
    - 5.2.4 弹性力相似准则 / 132
    - 5.2.5 表面张力相似准则 / 133
  - 5.3 量纲分析法 / 133
    - 5.3.1 量纲知识 / 134
    - 5.3.2 瑞利法 / 134
    - 5.3.3  $\pi$  定理 / 136
  - 5.4 近似的模型实验 / 138
  - 思考题 / 140
  - 习 题 / 141
- 第 6 章 黏性流体管内流动 / 143**
  - 6.1 黏性流体中的应力分析 / 143
    - 6.1.1 黏性流体中的应力 / 143
    - 6.1.2 切向应力互等定律 / 144
    - 6.1.3 广义牛顿内摩擦定律 / 145
  - 6.2 不可压缩黏性流体的运动  
微分方程 / 148
  - 6.3 黏性流体的两种流动状态 / 151
  - 6.4 管内流动的两种损失 / 153
    - 6.4.1 沿程损失 / 153
    - 6.4.2 局部损失 / 154
  - 6.5 流体在圆管中的层流流动 / 155
    - 6.5.1 断面流速分布 / 155
    - 6.5.2 沿程水头损失计算 / 157
  - 6.6 流体在圆管中的湍流流动 / 159
    - 6.6.1 湍流流动和时均参数 / 159
    - 6.6.2 湍流中的附加切向应力 / 160
    - 6.6.3 圆管湍流的结构 / 161
    - 6.6.4 圆管湍流的速度分布 / 163
    - 6.6.5 圆管湍流的沿程损失 / 166
  - 6.7 沿程损失系数的实验研究 / 166
    - 6.7.1 尼古拉兹曲线与沿程损失系数  
经验公式 / 166
    - 6.7.2 莫迪图 / 169
  - 6.8 局部损失系数 / 171
    - 6.8.1 管道截面突然扩大 / 171
    - 6.8.2 管道截面突然缩小 / 172
    - 6.8.3 弯 管 / 174
    - 6.8.4 其他管件 / 174
  - 6.9 管道的水力计算 / 174
    - 6.9.1 简单管道 / 175
    - 6.9.2 串联管道 / 178
    - 6.9.3 并联管道 / 178
    - 6.9.4 分支管道 / 181
  - 6.10 管道中的水击 / 182
    - 6.10.1 水击现象的物理过程 / 182
    - 6.10.2 最大压强升高值 / 184
    - 6.10.3 减弱水击的措施 / 184
  - 思考题 / 185
  - 习 题 / 185
- 第 7 章 黏性流体绕物体的流动 / 191**
  - 7.1 边界层的基本特征 / 191
    - 7.1.1 边界层概念 / 191
    - 7.1.2 边界层内的流态 / 191
  - 7.2 层流边界层的微分方程 / 193
  - 7.3 边界层的动量积分方程 / 194
  - 7.4 平板层流边界层的计算 / 196
  - 7.5 平板湍流边界层的计算 / 198
  - 7.6 平板混合边界层 / 201
  - 7.7 边界层分离 / 203
  - 7.8 物体在流体中运动的阻力 / 205

## 7.9 圆柱绕流边界层与阻力 / 207

思考题 / 210

习题 / 210

**第8章 气体动力学基础 / 212**

## 8.1 微弱扰动的传播速度 / 212

8.1.1 微弱扰动的一维传播 / 212

8.1.2 声速 / 214

8.1.3 马赫数 / 215

## 8.2 微弱扰动在空间流场中的

传播特征 / 215

8.2.1 静止流场( $v=0$ )中微弱扰动的传播特征 / 2158.2.2 直线均匀亚声速流( $v < c$ )中微弱扰动的传播特征 / 2158.2.3 直线均匀声速流( $v=c$ )中微弱扰动的传播特征 / 2168.2.4 直线均匀超声速流( $v > c$ )中微弱扰动的传播特征 / 216

## 8.3 气体一维定常流动的

基本方程 / 218

8.3.1 连续方程 / 218

8.3.2 运动方程 / 218

8.3.3 能量方程 / 219

## 8.4 气流的参考状态 / 219

8.4.1 滞止状态 / 219

8.4.2 极限状态 / 221

8.4.3 临界状态 / 221

8.4.4 速度系数 / 223

## 8.5 变截面等熵管流的流动特征 / 224

## 8.6 正激波 / 227

8.6.1 正激波的形成 / 228

8.6.2 正激波的传播速度 / 229

8.6.3 正激波基本关系式 / 230

## 8.7 收缩喷管中的流动 / 237

8.7.1 喷管出口截面的流速和流量 / 237

8.7.2 变工况流动分析 / 238

## 8.8 缩放喷管中的流动 / 241

8.8.1 出口流速、流量和面积比公式 / 241

8.8.2 变工况流动分析 / 242

思考题 / 245

习题 / 246

**习题参考答案 / 249****参考文献 / 255**

# 第 0 章 序 言

世界充满流体。流体力学和我们关系密切。我们打开水龙头,水就自动地流出来;打开空调,流动的空气在夏天为我们祛暑,在冬天为我们送暖;我们乘车、船、飞机出行,流体既提供推动力又施加阻力;我们体内的血液极规律地流动着,支持着我们生存。流体力学的基本原理在我们生活中时时在发挥作用。

人类的文明和进步与人类对流体力学原理的认识和掌握程度密切相关。

在古代,随着人类的农业灌溉和水上航行活动的增加,人类开始定性地认识水流动的规律。大约在公元前 250 年,阿基米德提出了浮力定律,这是人类运用流体力学原理定量地分析实际问题的开始。浮力定律的发现推动了造船和航海的发展。此后是漫长的经验流体力学的积累阶段。自然这期间也伴随着船只航行的发展和灌溉系统的改进。直到 17 和 18 世纪,牛顿(Newton)通过实验提出了黏性流体切应力公式,伯努利(Daniel Bernouli)通过实验观察提出了著名的不可压缩流体的伯努利方程,欧拉(Euler)提出流体运动的描述方法和无黏性流体运动的微分方程组,经典流体力学才建立起来。欧拉被公认为理论流体力学的奠基人。

经典流体力学在许多领域得到了不同程度的应用。但由于经典流体力学是建立在不考虑流体黏性的基础上的,它的原理在许多工程问题中不能应用。因为工程中的很多问题不能忽略流体的黏性。于是工程师们通过实验得出一些经验关系。但这些经验关系只能在狭窄的范围内适用。

在 19 世纪末期,物理学家和数学家的流体力学理论研究和工程师们的经验研究结合起来,相互交融,使流体力学产生了突破性进展。1883 年,雷诺(Osborne Reynolds)发表了关于湍流的实验研究的论文,其后又发表了关于湍流运动基本方程的论文。雷诺的研究为湍流的理论研究奠定了基础。20 世纪初,普朗特(Ludwig Prandtl)提出了边界层概念和边界层理论,标志现代流体力学建立。边界层理论为飞机制造和航空业的发展铺平了道路。

气体动力学的研究是在 19 世纪才开始的。1876 年黎曼(Riemann)发表了关于压缩波(激波)的论文,20 年后马赫(Mach)在超声速运动的抛物体上观察到了激波。在 19 世纪和 20 世纪之交,普朗特组织了气体动力学的系统研究。第二次世界大战前超声速风洞出现,战后超声速飞机问世。

当代流体力学仍是非常活跃的学科。流体力学与多种学科渗透、交叉形成许多流体力学新的分支,如研究两相或三相共存的流动的两相和多相流体力学、研究流动中有化学反应的化学流体力学、研究磁流体发电的磁流体力学、研究星云运动的天体流体力学、研究土壤内水流动的渗流力学,以及研究生物体内流体传输运动的生物流体力学等。特别是计算机技术的发展促使计算流体力学迅速发展,数值算法在 20 世纪中期出现。一些原来无法求解的复杂方程用计算机可以得到快速准确的解答。虽然计算机几乎可以加速一切研究和设计过程,但是计算机不能代替必要的实验。理论计算和实验相结合仍是解决流体力学问题

最有效的方法。

目前流体力学正广泛应用到各工程领域。航空航天、造船、水利等行业是与流体力学同步发展起来的,它们对流体力学的依赖自不必说;热能、动力的设备运行一刻也离不开其内部的流体(工质、润滑剂等)准确规律的运行;化学工业的生产是在伴有化学反应、传热、传质的流动过程中完成的。建筑业中的给排水与暖通、机械工业中的润滑与液压传动、电子产品的生产和计算机的运行常需要的严格的冷却要求等,都离不开流体力学原理。可以说,现在很难找到一个工程专业完全与流体力学无关。

本书为考虑多种工程专业的需要,适合中等学时使用的教材。全书共分8章,按照先一般后特殊、先简单后复杂的思路,第1章介绍流体力学最基本的概念,然后先讲静力学(第2章),再讲动力学(第3章及以后各章)。在动力学部分仍是按照同样的思路,先阐述流体动力学的基本概念和基本方程(第3章),再讨论各种流动情况。在讨论各种流动情况时还是由简单到复杂,先讨论理想流体(第4章),再讨论黏性流体。对于黏性流体,理论研究必须与实验研究相结合,因此我们在第5章介绍了指导实验的基本理论(相似理论与量纲分析)。然后先讲黏性不可压缩流体的一维流动(管内流动,第6章),再讲黏性不可压缩流体二维流动(绕物体的流动,第7章),最后讲最复杂的可压缩流体的基础理论(第8章)。由于近年来研究生的招生不断扩大,本教材既考虑了高级工程技术人才培养的需要,也考虑了研究型人才培养的需要。本教材在加强理论联系工程实际的同时注意了基本理论的加强和对研究能力的培养。

流体力学涉及的内容广泛,理论深奥。限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,希望读者多提宝贵意见,以便再版或重印时改进。

# 第 1 章 流体的主要物理性质

## 1.1 流体的特征及连续介质模型

### 1.1.1 流体的特征

在自然界中,物质一般是以固态、液态和气态三种状态之一存在的。呈现固态、液态和气态的物质分别为固体、液体和气体。固体具有特定的形状和一定的刚度,是一种不能流动的物质。液体和气体没有特定的形状,如果把一种液体装入一个容器中,那么除了上表面以外,它将呈现容器的形状;如果把一种气体装入一个密闭容器中,那么它将充满整个容器。因此,液体和气体都是极易流动的物质,通常我们把液体和气体通称为流体。

流体和固体对剪切应力的反应不同。当一个弹性体受到剪切应力的作用时,它的变形如图 1-1(a)所示。其角变形量  $\Delta\theta$ ,与剪切应力的大小  $F_1$  成正比,只要剪切应力保持不变且材料没有达到屈服点,弹性体的角变形就保持不变。为了说明流体对剪切应力的反应,我们可以在流体上滑动一个固体平板而对流体施加剪切应力,如图 1-1(b)所示。通过实验观察到,在这种情况下流体将产生连续变形,也正是这一特点被用作流体的基本定义。

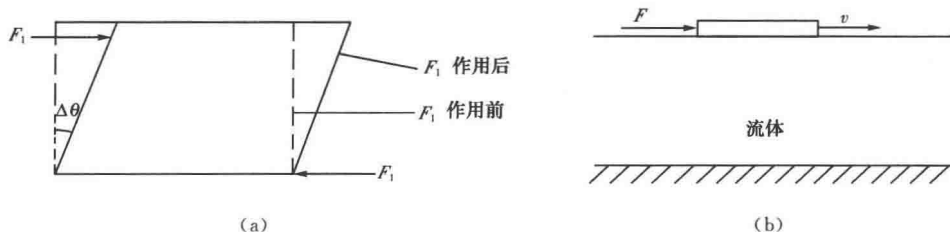


图 1-1

流体是一种受到任何微小剪切应力作用时,都能连续变形的物质。例如风吹水面,水面就会有小的波动;水滴在玻璃板上,由于重力作用会向四面摊开。

虽然液体和气体都是流体,但它们的性质却不完全相同。液体和气体的主要区别之一就是流动性的大小。由于气体分子间距大,作用力小,所以气体分子彼此的牵制力很小,不足以造成相互间的约束,因而气体分子可以自由运动。而液体分子间距小,作用力大,液体分子只能在小范围内做无规则运动,而不能像气体那样做足以充满整个空间的自由运动。所以气体的流动性比液体的大,当液体和气体接触时便会出现液体和气体的交界面,这种交界面称为液体的自由表面。

液体和气体的另一个区别是可压缩性的大小。气体在外力的作用下,表现出很大的可压缩性,而液体则不然。例如,水的压强由  $10^5$  Pa 增加到  $100 \times 10^5$  Pa 时,其体积仅减少原体积的 0.5%;而完全气体(热力学中的理想气体在流体力学中称为完全气体,以免与 1.4

节将介绍的理想流体概念相混)在等温过程中的体积同绝对压强成反比关系变化。可见两者的压缩性相差甚远。

### 1.1.2 连续介质模型

流体像其他物质一样都是由分子组成的,分子与分子之间有间隙存在,这就是说从微观角度来看流体并不是连续的,而是离散的。如果把流体看成是离散的,研究流体运动的规律将是十分困难的,因为我们不能把微分方程等数学工具直接用于离散介质中。但是流体力学并不研究微观的分子运动,而只研究流体的宏观机械运动,它是大量分子的平均统计行为。另外流体力学所研究的特征尺寸要远远大于分子间的距离(通常情况下,1 mm<sup>3</sup> 的空气约有  $2.7 \times 10^{16}$  个分子)。因此,在流体力学的研究中,将实际由分子组成的结构用一种假想的流体模型——流体微团来代替。

连续介质模型认为:流体由流体微团构成,流体微团(也称为流体质点)由足够数量的分子组成,连续充满它所占据的空间,彼此间无任何间隙。这就是 1753 年由欧拉(Euler)首先建立的连续介质模型。

在流体力学中,连续介质是一个宏观概念,在此概念下不需要考虑流体单个分子的情况,流体微团就是构成流体连续介质的最小单位。既然把流体当作连续介质来处理,那么描述流体特性的一系列参数,如压强、温度、密度、速度等就都可以看作是连续分布的。从而可以把它们看作是空间坐标和时间的连续可微函数,这就使得在流体力学的研究中使用微分方程等强有力的数学工具。整个流体力学的发展与引入连续介质模型是密切相关的,而从所建立的流体力学基本理论和实际工程应用结果来看,引入连续介质模型是完全合理的,也是完全必要的,该模型在流体力学发展史上有着非常重要的作用。

但是必须指出,连续介质模型也有一定的适用范围,在某些流动中它并不适用。例如当所研究的最小特征尺寸和分子的自由行程处于相同或相近的数量级时(例如火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及在高真空技术中等),就不能用连续介质作为其研究模型,而只能从微观着手进行研究。

## 1.2 流体密度的相关概念

### 1.2.1 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,它表征流体在空间的密集程度,以符号  $\rho$  表示。

取包围空间某点的微小体积  $\Delta V$ , 其中所含流体的质量为  $\Delta m$ , 比值  $\Delta m / \Delta V$  即  $\Delta V$  内的平均密度。若令  $\Delta V \rightarrow 0$ , 取该比值的极限, 便可得到该点处流体的密度, 即

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

必须指出,正如在流体的连续介质模型中所讨论的那样,这里数学上的  $\Delta V \rightarrow 0$ , 从物理学上应理解为体积缩小为无穷小的流体微团,它的体积同被考查的流体的体积相比是完全忽略不计的,但是它必须包含足够多的分子,这样才能把流体当作连续介质来处理。以后遇

到类似的情况都应该这样去理解。

对于空间各点处密度相同的均质流体,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中  $\rho$  ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$  ——流体的质量,  $\text{kg}$ 。

流体的密度随温度和压强的变化而变化。实验表明,流体的密度随温度和压强的变化很小,一般情况下可以视为常数。例如水的密度,实用上就应在一个标准大气压下,温度为  $4\text{ }^\circ\text{C}$  时的最大密度作为计算值,其数值为  $\rho = 1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。水银的密度为  $13.6 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 列出了水、空气和水银在标准大气压下不同温度时的密度。

表 1-1 不同温度下水、空气和水银的密度

温度/ $^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$			温度/ $^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$		
	水	空气	水银		水	空气	水银
0	999.87	1.29	13 600	60	983.24	1.06	13 450
10	999.73	1.24	13 570	80	971.83	0.99	13 400
20	998.23	1.20	13 550	100	958.38	0.94	13 350
40	992.24	1.12	13 500				

### 1.2.2 流体的相对密度

某均质流体的密度与  $4\text{ }^\circ\text{C}$  时水的密度的比值称为该流体的相对密度,用符号  $d$  表示,即

$$d = \rho_f / \rho_w \quad (1-3)$$

式中  $\rho_f$  ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\rho_w$  —— $4\text{ }^\circ\text{C}$  时水的密度,为  $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

顺便说明,某流体的重力与  $4\text{ }^\circ\text{C}$  时同体积水的重力的比值称为该流体的比重。流体的比重与流体的相对密度数值相等。

### 1.2.3 流体的比容

单位质量流体所占有的空间体积称为比容或比体积,用符号  $v$  表示,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。显然流体的密度与比容互为倒数,即

$$v = 1/\rho \quad (1-4)$$

### 1.2.4 混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算,计算式如下:

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-5)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$  ——混合气体中各组分气体的密度;

$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$  ——混合气体中各组分气体所占的体积百分数。

### 1.2.5 流体的容重

单位体积流体所受的重力称为流体的容重或重度,用符号  $\gamma$  表示,单位是  $\text{N}/\text{m}^3$ 。密度与容重之间具有如下关系:

$$\gamma = \rho g \quad (1-6)$$

## 1.3 流体的压缩性和膨胀性

因为流体的密度是温度和压强的函数,所以流体所占据的体积将随压强、温度的变化而变化。变化的规律通常是:压强增加,体积缩小;温度升高,体积膨胀。流体的这种属性就是流体的压缩性和膨胀性。

### 1.3.1 流体的压缩性

流体体积随压强变化的属性通常以压缩系数或体积模量来表示,分别用符号  $\kappa$ 、 $K$  来标记。

压缩系数的定义:当流体的温度保持不变时,单位压升所引起的体积变化率称为压缩系数。压缩系数由下式确定:

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-7)$$

式中  $\kappa$  —— 压缩系数,  $\text{Pa}^{-1}$ ;

$V$  —— 压强为  $p$  时流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

由于压强增加,体积缩小,反之亦然,因而  $\frac{dV}{dp}$  总是负值,为此我们在式(1-7)的右侧引入一个负号,以使  $\kappa$  总为正值。

式(1-7)表明,对于同样的压强增量,  $\kappa$  值大的流体,其体积变化率大,较易压缩;  $\kappa$  值小的流体,其体积变化率小,较难压缩。由此可见  $\kappa$  表示流体压缩性的大小。

根据质量守恒原理,流体压强变化前后质量无变化,则

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

即

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

所以,压缩系数  $\kappa$  也可以表示为

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-8)$$

压缩系数的倒数称为体积模量(或弹性模量),用  $K$  来表示,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-9)$$

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小。 $K$  值大的流体的压缩性小,  $K$  值小的流体的压缩性大。 $K$  的单位与压强相同,为  $\text{Pa}$ 。

流体的体积模量也随压强和温度的变化而变化,表 1-2 给出了不同状态下水的体积模量。



表 1-2 水的体积模量

温度/°C	$K/(10^9 \text{ Pa})$				
	$p=0.490 \text{ MPa}$	$p=0.981 \text{ MPa}$	$p=1.961 \text{ MPa}$	$p=3.923 \text{ MPa}$	$p=7.845 \text{ MPa}$
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

例 1-1 水在厚壁圆筒中受压缩,当压强为 1 MPa 时,其体积为  $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,当压强增至 5 MPa 时,其体积变为  $0.998 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,求水的体积模量  $K$ 。

解 将上述实测数据代入式(1-9)中,得

$$K = -V \frac{dp}{dV} \approx -\frac{V\Delta p}{\Delta V} = -\frac{1 \times 10^{-3} \times (5 - 1)}{(0.998 - 1) \times 10^{-3}} = 2000 \text{ MPa}$$

### 1.3.2 流体的膨胀性

流体的体积随温度变化的属性通常用体膨胀系数来表示。

当压强保持不变时,单位温升所引起的体积变化率称为体膨胀系数,以  $\alpha_v$  表示,其表达式为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-10)$$

式中  $\alpha_v$  ——流体的体膨胀系数,  $\text{K}^{-1}$ ;

$V$  ——温度为  $T$  时流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

由于温度升高,体积膨胀,故  $dT$  与  $dV$  同号。

水的体膨胀系数见表 1-3。

表 1-3 水的体膨胀系数

$p/\text{MPa}$	$\alpha_v/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$				
	1~10 °C	11~20 °C	40~50 °C	60~70 °C	90~100 °C
0.098 1	14	150	422	556	719
9.807	43	165	422	548	704
19.61	72	183	426	539	
49.03	149	236	429	523	661
88.26	229	289	437	514	621

### 1.3.3 可压缩流体和不可压缩流体

所谓不可压缩流体是指受压时体积不缩小,受热时体积不膨胀,即密度为常数的流体。反之,密度不为常数的流体称为可压缩流体。实际上,自然界中的所有流体,不论是气体还是液体,都是可压缩流体。流体压缩性的大小与所处的温度、压强有关,在工程计算中若考虑流体压缩性,问题会很复杂。在某些情况下,忽略流体压缩性将会有助于问题的简化。

由表 1-2 可以看出,水的压缩性是很小的,压强每增加  $10^5 \text{ Pa}$ ,其体积变化率不到万分之一。工程上常用的其他工作液体的压缩性也是比较小的。因此在工程上常可以忽略液体