



普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

工程流体力学

周乃君 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材

工程流体力学

主编 周乃君
参编 陈卓 张家元
李贺松 黄庆
主审 熊源泉



机械工业出版社

本书围绕流体流动问题的理论分析、数值计算和试验研究三种求解思路,系统地讲述了流体的基本性质、流体静力学、理想流体一元流动和二元流动解析、黏性流体层流运动解析、湍流理论和工程湍流解析、量纲分析与相似原理、计算流体力学基础等内容。

本书可作为能源动力类专业的教学用书,也可作为相关专业的工程流体力学课程教学参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/周乃君主编. —北京:机械工业出版社,
2014.9

普通高等教育“十二五”卓越工程能力培养规划教材
ISBN 978-7-111-47616-0

I. ①工… II. ①周… 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 (2014) 第 183467 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:蔡开颖 丁昕祯

责任编辑:蔡开颖 丁昕祯 李乐 姜凤

版式设计:霍永明 责任校对:陈秀丽

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.25 印张·441 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47616-0

定价:36.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

流体流动是自然界和工程技术领域普遍存在的现象。流体力学作为解释和研究流动现象的基本规律并应用于解决实际流动问题的学科,是人类在认识自然、改造自然的实践中产生和发展起来的。现代流体力学作为一个重要的学科分支,大致起源于17世纪中期,300多年来,在一大批力学家、数学家和工程师的探索下,取得了丰硕的成果,形成了较为完整的理论体系,并解决了诸多技术问题,在工程实践中发挥了巨大的作用,同时也促进了科学技术的向前发展。

工程流体力学广泛应用于气象、航空与航天、航海与造船、水利工程、能源动力、车辆设计、军械设计、采矿工程、土木工程、化工与冶炼、材料加工、机械与传动、冷却与润滑、仪器仪表、体育运动研究等领域,是这些学科领域所需的技术基础,也是能源动力学科的重要学术基础,因此是能源动力类专业的主干课程,是后续专业课程学习的基础。

本书主要结合能源动力类专业教学需要,在反映传统工程流体力学教学内容和体系的基础上,适当增加了湍流理论、计算流体力学基础等内容,同时注重结合工程实际问题,围绕“提出问题—分析问题—抽象简化—求解方法—结果检验—扩展应用”这一教学体系,将相关理论贯穿于典型工程问题的求解思路和方法中,注重激发学生的学习兴趣,启迪创新性思维,培养学生提出问题、分析问题和解决问题的能力。

全书共分13章,围绕流动问题的理论分析、数值计算和试验研究三种求解思路,系统地讲述了流体的基本性质、流体静力学、理想流体一元流动和二元流动解析、黏性流体层流运动解析、湍流理论和工程湍流解析、量纲分析与相似原理、计算流体力学基础等内容。其中第1~7章为基础篇,第8~13章为提高篇,可分为两个学期进行教学。为适应不同学时教学需要(72~96学时),书中设置了部分章节(即带*的节)作为选学或学生自学的内容。

本书由中南大学周乃君(第1、2、8、9、10、11章)、陈卓(第3、4章)、张家元(第5、6章)、李贺松(第7、12章)、黄庆(第13章及附录)编写,并由周乃君统稿。全书由周乃君担任主编,东南大学熊源泉担任主审。

本书获得了中南大学卓越工程师计划精品教材专项经费的资助。书中参考和引用了许多作者的论著,由于篇幅所限,未予一一注明。编者在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,疏漏之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第1章 绪论	1
1.1 流体与流体力学概念	1
1.2 流体力学发展简史	2
1.3 知识体系与应用领域	3
1.4 流体力学研究方法	4
1.5 学习中应注意的几个问题	5
思考与练习	6
第2章 流体的基本性质	7
2.1 流体的密度与可压缩性	7
2.2 流体的分散性与连续介质假设	9
2.3 流体的黏性与理想流体模型	10
2.4* 表面张力与毛细现象	16
2.5 流体的受力	18
思考与练习	19
第3章 流体静力学	20
3.1 问题的提出	20
3.2 静止流体的应力特征	20
3.3 静止流体的力平衡微分方程	21
3.4 静止液体的压强	23
3.4.1 静压的物理概念	23
3.4.2 等压面	23
3.4.3 静止液体内的压强分布	24
3.5 静止大气的压强分布	25
3.6 压强的测量	26
3.6.1 压强的单位	26
3.6.2 绝对压强、相对压强、真空度	27
3.6.3 压强测量方法	28
3.7 静止液体作用在壁面上的总压力	32
3.7.1 静止液体作用在平面壁上的压力	32
3.7.2 静止液体作用在曲面壁上的压力	34
3.8* 非惯性系中流体的相对平衡	36
3.8.1 流体作匀加速直线运动	36
3.8.2 流体绕垂直轴作匀角速度旋转运动	37
3.9* 浮力及浮体的平衡	39
思考与练习	40
第4章 理想流体运动基本方程	43
4.1 问题的提出	43
4.2 描述流体运动的两种方法	43
4.2.1 拉格朗日法	44
4.2.2 欧拉法	44
4.2.3 随体导数	45
4.2.4 流动分类	46
4.3 流体运动的基本概念	47
4.3.1 迹线与流线	47
4.3.2 流管与流束	48
4.3.3 过流断面与流量	49
4.3.4 系统与控制体	50
4.4 连续性方程	50
4.4.1 微分形式的连续性方程	50
4.4.2 连续性方程的简化形式	51
4.5 理想流体运动微分方程	52
4.6 伯努利方程	54
4.6.1 微元流束伯努利方程	54
4.6.2 流线法线方向的压强变化	55
4.6.3 总流伯努利方程	56
4.7 伯努利方程的扩展应用	57
4.7.1 分流或汇流	57
4.7.2 有能量输入或输出的情形	58
4.7.3 非定常流	58
4.7.4 毕托管测量流速	59
4.7.5 文丘里流量计	60
4.8 动量方程与动量矩方程	61
4.8.1 动量方程	61
4.8.2 动量矩方程	62
4.8.3 动量方程与动量矩方程的应用举例	63
4.9* 叶轮机基本方程	67
4.9.1 涡轮机械内相对运动的伯努利方程	67
4.9.2 涡轮机内流体的动量方程与动	

量矩方程	68	6.7.1 小扰动波的传播及声速	112
思考与练习	69	6.7.2 膨胀波	114
第5章 不可压缩黏性流体一元流动	72	6.7.3 激波	114
5.1 问题的提出	72	6.7.4 激波前后的参数关系	116
5.2 黏性流体管内流动的伯努利方程及 能量损失	72	6.7.5 拉伐尔喷管的非设计工况流动 分析	117
5.2.1 黏性流体总流的伯努利方程	72	思考与练习	119
5.2.2 沿程阻力损失	73	第7章 理想流体平面运动	121
5.2.3 局部阻力损失	74	7.1 问题的提出	121
5.2.4 流体输送系统的能量方程	74	7.2 理想流体微团运动分析	121
5.3 两种流动形态	75	7.2.1 理想流体运动分解	122
5.4 圆管中层流流动分析	77	7.2.2 有旋流动与无旋流动	123
5.5 管内湍流的分区特征与速度分布	79	7.3 速度环量与涡量	123
5.5.1 分区特征	79	7.3.1 速度环量	123
5.5.2 湍流的速度分布	80	7.3.2 旋涡强度	124
5.6 管内湍流的沿程阻力系数	82	7.3.3 斯托克斯定理	124
5.6.1 经验公式	82	7.4 速度势与流函数	125
5.6.2 尼古拉兹试验	83	7.4.1 速度势函数	125
5.6.3 莫迪图	84	7.4.2 流函数	127
5.7 非圆形管道沿程损失的计算	85	7.4.3 势函数与流函数的关系	128
5.8 局部阻力系数	86	7.5 复位势及其性质	129
5.9* 工程实例分析	89	7.5.1 复位势的概念	129
5.9.1 虹吸管	89	7.5.2 复位势的性质	129
5.9.2 管嘴(厚壁孔口)定常出流	90	7.6 基本的平面势流	130
5.9.3 烟囱	90	7.6.1 均匀直线流	130
5.9.4 管路计算	91	7.6.2 点源和点汇	130
5.9.5 管流中的水击	96	7.6.3 点涡	132
思考与练习	97	7.7 有势流动的叠加	134
第6章 可压缩气体一元流动	100	7.7.1 螺旋流	134
6.1 问题的提出	100	7.7.2 偶极子流	135
6.2 压缩性气流的能量方程	100	7.7.3* 均匀等速流绕圆柱体无环量 流动	138
6.3 压缩性气流的连续性方程	102	7.7.4* 均匀等速流绕圆柱体有环量 流动	139
6.4 压缩性气流中各参数的变化规律	103	7.8 理想流体的旋涡运动	141
6.4.1 滞止参数	103	7.8.1 涡线、涡管、涡束和涡通量	141
6.4.2 临界参数	105	7.8.2 汤姆逊定理	142
6.5 压缩性气体经喷管的流动	106	7.8.3 亥姆霍兹定理	143
6.5.1 收缩型喷管(或孔口出流)	106	7.8.4 涡丝的诱导速度	144
6.5.2 经拉伐尔喷管的流动	107	思考与练习	145
6.6 压缩性气体的等温管流	109	第8章 黏性流体运动方程及其基 本解	147
6.6.1 基本公式	109		
6.6.2 压降公式	110		
6.6.3 流量公式	111		
6.7* 气体激波	112		

8.1 问题的提出	147	讨论	205
8.2 雷诺输运定理与连续性方程	148	10.5.2 湍流模式理论分类及特点	205
8.3 变形率张量与亥姆霍兹定理	151	10.5.3 涡黏度与布辛涅斯克假设	206
8.4 黏性流体的受力分析	155	10.5.4 0 方程模式	206
8.5 动量方程	156	10.5.5 单方程模式	207
8.6 本构方程	157	10.5.6 双方程模式	208
8.7 纳维-斯托克斯方程	159	10.5.7* 雷诺应力与代数应力模型 简介	209
8.8 运动方程组的封闭性与定解条件	160	思考与练习	211
8.8.1 基本方程组的封闭性讨论	160	第 11 章 工程湍流的半经验解法	213
8.8.2 定解条件	161	11.1 问题的提出	213
8.8.3 求解方法	162	11.2 混合长度与流速分布律	214
8.9 二维平面层流解	162	11.3 圆管内湍流	216
8.10 二维轴对称层流解	166	11.3.1 时均运动方程	216
8.11* 低雷诺数流动解	168	11.3.2 流速分布律	218
思考与练习	172	11.3.3 光滑管流动阻力	218
第 9 章 边界层流动	174	11.3.4 粗糙管流动阻力	219
9.1 问题的提出	174	11.4 平壁湍流速度边界层	220
9.2 边界层流动的基本特征	175	11.4.1 基本方程	220
9.3 边界层运动方程	178	11.4.2 分区特征	221
9.4 边界层方程的相似性解	180	11.4.3 壁面律	222
9.5 平板边界层的布拉修斯精确解	183	11.4.4 速度边界层	222
9.6 边界层积分方程解法	186	11.4.5 层流—湍流组合边界层	224
9.6.1 边界层动量积分方程	186	11.5* 射流与尾流	225
9.6.2 边界层能量积分方程	187	11.5.1 基本特征	225
9.6.3 平板边界层的积分近似解法	188	11.5.2 流速衰减规律	226
9.6.4* 绕流问题的积分近似解法	191	11.5.3 相似解法	227
思考与练习	193	思考与练习	230
第 10 章 湍流与湍流理论	195	第 12 章 量纲分析与相似原理	232
10.1 问题的提出	195	12.1 问题的提出	232
10.2 湍流的形成及特征	196	12.2 单位与量纲	233
10.2.1 黏性运动的有旋性与湍流 特征	196	12.3 量纲分析法	234
10.2.2 层流的稳定性	197	12.3.1 瑞利法	234
10.2.3 猝发现象与涡的迁移	198	12.3.2 Π 定理	236
10.2.4* 湍流的拟序结构	199	12.4 相似原理	238
10.3 湍流描述方法	200	12.5 相似准则	239
10.4 湍流运动基本方程	201	12.6 基本方程的相似变换	241
10.4.1 连续性方程	201	12.6.1 由基本方程导出相似准则数	241
10.4.2 动量方程 (雷诺方程)	202	12.6.2 局部相似	243
10.4.3 平均动能方程	203	12.6.3* 基本方程组的化简	244
10.4.4 涡量方程	204	12.7 模型试验设计	245
10.5 湍流模式理论	205	思考与练习	246
10.5.1 湍流运动基本方程的封闭性		第 13 章 计算流体力学基础	248

13.1 问题的提出	248	13.6 多变量联立代数方程组的求解	260
13.2 基本方程与定解条件	249	13.6.1 流函数—涡量法	260
13.2.1 流体运动的基本方程组	249	13.6.2 交错网格的原始变量法	261
13.2.2 定解条件	250	13.7 SIMPLE 算法	262
13.2.3 解的确定性问题	251	13.7.1 计算方法与步骤	262
13.3 数值求解的一般步骤	251	13.7.2 压强校正方程的讨论	264
13.3.1 前处理	251	13.8* 通用 CFD 软件简介	265
13.3.2 计算过程	253	思考与练习	267
13.3.3 后处理	253	附录	268
13.4 离散化方法	253	附录 A 常见流体的物理性质	268
13.4.1 泰勒级数展开法	254	附录 B 工业管道的粗糙度与常用局部阻力	
13.4.2 控制容积法	254	系数表	269
13.4.3 显式方法和隐式方法	255	附录 C 向量代数	271
13.4.4 有限差分方程	255	附录 D 张量初步	275
13.5 单变量代数方程组的求解	257	附录 E 柱坐标系与球坐标系中的流体力学	
13.5.1 直接求解法	257	基本方程组	279
13.5.2 迭代法	259	参考文献	283
13.5.3 松弛法	260		

第1章 绪论

作为全书的开篇，本章主要介绍流体与流动现象，流体力学的概念与发展简史、知识体系与应用领域、研究方法，以及学习中要注意的几个问题。

1.1 流体与流体力学概念

气体、液体和固体是自然界中物质存在的主要形式。气体与液体的共同特点是自身不能保持一定的形状，具有**流动性**，故统称为**流体 (Fluid)**，换句话说，**流体就是可以流动的物质**。那么，什么叫作可流动性呢？这主要有两种理解：一是指在没有容器容纳它时，不能像固体一样保持一定的形状；二是指当其受到外力（剪力）作用时会发生连续的变形运动。因此，基于这一点，对流体的更严谨的定义为：**流体是在任意微小的剪力作用下都能发生连续变形的物质**。

流体的重要特征是在力的作用下发生运动，这种运动就称为**流动 (Flow)**。实例：液体在管内的流动、水在水渠内的流动、大气运动、喷嘴出口的流动、柱体绕流现象、翼形的绕流、热交换器内部的流动、锅炉炉膛内的流动及汽轮机内部的流动等。

分析、解释这些流动现象并研究其规律的科学称为**流体力学 (Fluid Dynamics 或 Fluid Mechanics)**，换句话说，**流体力学是研究流体在力的作用下的平衡和运动规律的科学**。流体力学与刚体力学（理论力学）、材料力学、弹性力学并称为**四大力学**。

工程流体力学 (Engineering Fluid Mechanics) 则是将流体力学的研究方法及相关理论着重应用于解决工程中的流体流动问题的科学。

无论是流体力学还是工程流体力学，都是人类在认识自然、改造自然的实践中产生和发展起来的学科。古代的人们在兴修水利、灌溉农田的实践中开始认识和利用水流的规律，在利用风能的实践中认识空气的运动规律。在古代，虽然缺乏系统的流体力学知识，但凭借直觉和不断的实践，古人逐渐认识和掌握流体运动的一些规律，并建造了许多伟大的工程，如都江堰水利枢纽工程、玛雅人的地下管网工程，还有古代的造船工程，等等。

现代流体力学作为一个重要的学科分支，大致起源于17世纪中期。1653年，帕斯卡 (B. Pascal) 发现了静止液体的压强可以均匀地传遍整个流体的帕斯卡原理，随后又提出了流体静力学的基本公式；1678年，牛顿 (I. Newton) 用试验方法研究了运动平板所受的流体阻力，提出了牛顿内摩擦定律，为研究实际流体的运动打下了重要基础。此后，在许多科学家的贡献下，流体力学开始逐步确立起科学体系，并在工程实践中发挥出巨大的作用，同时又反过来促进了人们对流体运动规律的更深入的认识，从而推动了流体力学的不断向前发展。

下面简要介绍流体力学的发展简史、研究方法和应用领域。

1.2 流体力学发展简史

流体力学的发展大致经历了五个阶段。

● 第一阶段：公元前 30000 年—公元前 3000 年（石器时代）

这一时期以“水、火、风”能的初步利用为特征，具体应用于石器、陶具、风帆、水钟、引水灌溉等领域。

● 第二阶段：公元前 3000 年—1678 年

这一时期以简单流体机械为特征，具体应用于水车、风车、风箱、火箭等领域。这个时期出现了阿基米德浮力定理、帕斯卡定律。

● 第三个阶段：1678 年—1900 年

这一时期相继发现了一些重要理论，是流体力学体系初步形成和发展的时期。具体包括：

- 牛顿 (I. Newton) 黏性定理, 1678 年
- 伯努利 (D. Bernoulli) 定理, 1738 年
- 罗蒙诺索夫 (M. V. Lomonosov) 质量守恒定律, 1748 年
- 达朗贝尔 (J. R. D' Alembert) 连续性方程, 1752 年
- 毕托管 (H. Pitot), 1732 年
- 欧拉 (L. Euler) 方程组, 1775 年
- 拉格朗日 (J. L. Lagrange) 定理 (无旋运动), 1781 年
- 亥姆霍兹 (H. V. Helmholtz) 定理 (旋涡运动), 1845 年
- 纳维 (C. L. M. H. Navier, 1823 年) - 斯托克斯 (G. G. Stokes, 1845 年) 方程
- 迈尔 (J. R. Mayer, 1842 年) - 焦耳 (J. P. Joule, 1848 年) 能量守恒定律
- 达西 (H. P. G. Darcy) 公式, 1856 年
- 雷诺 (O. Reynolds) 试验, 1883 年
- 雷诺方程, 1895 年
- 瑞利 (L. Rayleigh) 量纲分析法, 1899 年

● 第四阶段：1900 年—1950 年（空气动力学时期）

这一时期是流体力学在空气动力学方面的应用和深入发展时期，发现的重要定理和试验方法有：

- 库塔 (W. M. Kutta, 1902 年) - 儒可夫斯基 (N. E. Joukowski, 1906 年) 绕流定理
 - 布拉修斯 (H. Blasius) 公式, 1910 年
 - 帕金汉 (E. Buckingham) Π 定理, 1914 年
 - 卡门涡街 (T. Von Karman), 1912 年; 动量积分方程, 1921 年
 - 普朗特 (L. Prandtl) 三维机翼理论, 1913 年
 - 风洞 (Wind funnel), 1902 年——布泽曼 (A. Busemann)
 - 热线流速仪 (hot-wire anemometer), 1933 年——德莱顿 (H. L. Dryden)
 - 尼古拉兹 (J. Nikuradse) 试验, 1933 年
- ### ● 第五个阶段：1950 年至今（渗透与分支）

这一时期是流体力学的深入发展时期，出现了许多流体力学的分支。它们包括：

- 计算流体力学
- 实验流体力学
- 可压缩气体力学
- 稀薄气体力学
- 磁流体力学
- 化学流体力学
- 非牛顿流体力学
- 生物流体力学
- 多相流体力学
- 渗流力学
- 天体—地球物理流体力学

同时出现了相关的测量方法和仪器，如激光干涉仪、激光多普勒测速仪、粒子成像测速仪（PIV）等。

纵观流体力学的发展历史，可以看出：

1) 生产和生活的需要是产生和发展科学技术的动力。没有水利、航运、航空、能源、化工、冶金、机械、材料等方面的需求，就没有现在的流体力学。

2) 从旧石器时代到现在，人类文化的演进是以加速度进行的。对于流体力学而言，在17世纪下半叶以后的350年中取得了惊人的进展。

3) 在流体力学的发展过程中，实验及在工程技术中的实践是最先使用的一种研究方法，流体力学中的所有重要现象和原理，几乎都是通过实验或实践发现的，因此实验和实践对流体力学的发展具有特别重要的意义。

4) 人们的认识总是遵循由简单到复杂，从具体到抽象，从特殊到一般的科学规律。流体力学的研究与发展也遵循这一规律。它从流体的静止与平衡到单相无黏性流体的定常运动，再发展到多相不稳定的湍流运动，从单纯的力学分支发展到复杂的交叉学科，从单纯的动量传输发展到动量、热量、质量的综合传递。

5) 流体力学虽然已经取得了巨大进展，但一些重要问题如湍流、流动稳定性、非定常流动等仍然未获得圆满解决，此外，众多的流体力学新分支或交叉学科都还处于发展初期，这些工作还有待于流体力学工作者的进一步努力。

6) 13世纪以前，我国在流体力学的应用方面为人类作出过重要贡献，曾领先于世界，20世纪40年代以后，在理论上也取得了不少成绩，不仅建造了大量的实验设施，解决了许多工程实际问题，还培养和造就了具有较高水平的科研队伍，这为今后进一步发展我国在流体力学相关领域的研究，奠定了坚实的基础。

1.3 知识体系与应用领域

现代流体力学从知识体系方面可分为两大体系：

- 理论流体力学：侧重理论研究（数理模型、分析解、数值方法）；
- 工程流体力学：侧重工程应用（应用流体力学原理解决工程问题）。

从应用对象方面主要分为水力学 (Hydraulics) 和气体动力学 (Gas Dynamics 或 Aero Dynamics)。

从研究的内涵方面又有广义和狭义之分。

- 广义: 考虑传热、传质及化学反应;
- 狭义: 不考虑传热、传质及化学反应。

工程流体力学作为许多学科的基础, 其应用领域十分广泛, 主要包括以下几类:

- 气象领域: 气象预报、洋流研究;
- 航天与航空领域: 航空与航天器设计制造;
- 航海与造船领域: 船舶、潜艇的设计与制造;
- 水利工程领域: 库坝设计、引水灌溉、水力机械的设计与制造;
- 地面交通领域: 车辆设计与制造;
- 军事领域: 枪械、弹药、导弹设计与制造;
- 资源开采领域: 水压采油、矿井通风;
- 能源动力领域: 水轮机、汽轮机、发动机、风力机的设计制造、炉窑设计;
- 化工、冶金、材料领域: 炉窑与热交换器设计、物料输送;
- 土木工程领域: 桥梁、隧道设计, 建筑通风与消防, 供暖、空调、给排水系统设计;
- 流体输运领域: 管网设计、泵与风机的设计制造;
- 液压 (气动) 传动领域: 水压机、水力切削、气动阀设计与制造;
- 冷却与润滑领域: 热交换器、轴承设计与制造;
- 仪器仪表领域: 测压计、测速仪、流量计的设计制造与应用;
- 体育运动领域: 游泳服设计、田径及球类运动研究等。

1.4 流体力学研究方法

流体力学的研究方法主要包括理论分析、实验研究、数值计算三个方面。

1. 理论分析

这种方法首先是根据研究对象进行合理抽象, 然后建立数学物理模型 (包括基本方程与定解条件), 最后求出问题的解 (解析解、近似解)。其优点是解的结果的普适性好, 其缺点是数学计算难度大、分析解有限。这种方法是其他方法的基础, 因此也是所有流体力学教程的重点内容。

2. 实验研究

流体力学总体上属于实验学科, 以科学实验为重要基础, 因此本教材中将安排适当章节进行讲解。实验研究通常包括实物试验、模型试验 (以相似原理为基础) 两类。其优点是可以发现新现象、新原理, 验证其他方法得到的研究结论; 其缺点是研究结果依赖试验条件, 普适性较差。

3. 数值计算

数值计算方法是随着计算机技术的发展而兴起的, 该方法首先是根据研究对象进行合理抽象, 建立数学物理模型 (基本方程与定解条件), 然后采用合适的数值计算方法在计算机上编程计算出问题的解。其优点是应用面广泛, 可获得其他方法难以获得的解, 而且输出结

果形象直观,可取代部分试验工作,节省投资,因此有时也称为数值试验;其缺点是获得的解具有近似性和不稳定性,而且求解时间和精度依赖于计算机性能,计算结果也需要试验的检验。这种方法目前得到了广泛采用,因此本教材中也将安排适当章节进行介绍。

需要指出的是,尽管流体力学已经建立起了相当完整的理论体系,但相关理论尚不完备,特别是湍流问题、反应性流体流动、非牛顿流体流动等方面仍然需要试验支持,故流体力学属于试验性技术科学。

综上所述,对于流体力学的三种研究方法,各有其优缺点,它们是相互补充的。一个流体力学工作者,应当熟练地掌握这些方法,以便根据具体情况,取长补短地加以应用。本教材侧重于理论分析方法的介绍和工程应用分析,对试验研究方法和数值计算方法的基本原理,也将简要述及。

1.5 学习中应注意的几个问题

“工程流体力学”是能源动力类专业的专业主干课程,是上承数学、物理,下接热力学、传热学、燃烧学等课程的基础性课程,也是后续各门专业课程学习的重要基础。本课程结合能源动力类专业教学和日后工作需要,在反映传统工程流体力学的教学内容和体系的基础上,适当增加了湍流理论、计算流体力学基础等内容。同时注重结合工程实际问题,围绕提出问题—分析问题—抽象简化—求解方法—结果检验—扩展应用这一教学体系,将相关理论贯穿于典型工程问题的求解思路和方法中,从而避免平铺直叙式的枯燥理论推演,以便激发学习兴趣,克服畏难情绪,引导创新性思维,注重提出问题、分析问题和解决问题能力的培养。因此在学习中应注意以下几个方面:

1) “工程流体力学”是将流体力学的研究方法及相关理论着重应用于解决工程中的流体流动问题的学科,从其发展进程来看,许多结论都是先由实验现象引出的,同时其理论成果也须通过实验加以检验,可以预见,试验对其今后的研究与发展仍将起着十分重要的作用。因此,“工程流体力学”是一门实践性很强的课程,在学习中应当充分重视相应的课程实验,掌握实验原理和基本方法,同时也需要加强练习,通过大量的习题理解和掌握基本理论,并能应用于解决工程实际问题。

2) 本课程用到的数学工具较多,数学难度也较大,因此在课程讲授和学习过程中,应注意复习和巩固相关的数学知识,克服畏难情绪,做到能较熟练地使用相应的数学工具来表述和解析流体力学问题,从而初步建立起应用合适的数学工具来解决本专业问题的能力,为后续课程的学习打下良好的基础。

3) 工程实际问题的研究,常需要进行合理的抽象与简化,然后选用适当方法进行分析与求解。流体力学的理论分析、试验研究方法和数值计算是分析和解决流体流动问题的三种研究方法,本教材因篇幅有限,侧重于理论分析方法的介绍和简单工程实例分析,对试验研究方法和数值计算方法的基本原理只是简要述及,但这并不表示后两种方法就不重要,事实上,对于比较复杂的工程问题的研究,后两种方法更为重要。这可以通过今后的学习和实践逐步加以理解和掌握。

思考与练习

- 1-1 流体的定义是什么？其主要特征又是什么？
- 1-2 何谓流体力学？何谓工程流体力学？
- 1-3 流体力学的发展可分为哪几个阶段？其主要特征是什么？
- 1-4 从体系结构和侧重点来看，流体力学是如何分类的？
- 1-5 为什么说流体力学是应用十分广泛的实验性技术基础科学？
- 1-6 流体力学有哪几种研究方法？其基本思路是什么？各有何优缺点？
- 1-7 学习工程流体力学应当注意哪几方面的问题？

第 2 章 流体的基本性质

研究流体的运动规律，需要先了解流体的基本性质。流体的基本物理性质主要包括：密度、膨胀系数、黏度、表面张力系数等。下面依次进行介绍。

2.1 流体的密度与可压缩性

1. 密度

流体的密度 (Density) 是单位体积流体所具有的质量。在均质流体中，其表达式如下：

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

式中， V_c 为流体所占据的体积，国际单位制 (SI 制) 中单位为 m^3 ； m 为体积 V_c 中包含的流体的质量，单位为 kg ； ρ 为流体的密度，单位为 kg/m^3 。

对于非均质流体，流体空间各点处的密度是不同的。这时各点处的密度可定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V_c \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V_c} \quad (2-2)$$

注意， $\Delta V_c \rightarrow 0$ 只能视为微小体积趋于足够小，而不能理解为数学上的趋于零。因为从微观上看，流体是由流体分子构成的，而分子间存在空隙，如果将微小体积 ΔV_c 取到分子大小，那就可能出现该体积中包含或不包含分子的可能，在不包含分子时，对应的质量为零，即得到流体密度为零这样荒谬的结果。所以流体力学中所取的微小体积应当包含大量分子 (或原子)，其密度就是微小体积所包含的大量分子 (或原子) 的质量与所占据的体积的比值。但从宏观上讲，这种微小体积所占据的空间又是非常小。一般把这种空间上足够小、又包含大量流体分子的微小体积，称为**流体微团**，也称为**流体质点 (Particle)**。

书末附录 A 给出了标准大气压下常见流体的密度。

流体的密度与其温度和压强有关。温度 T 的变化或压强 p 的变化都会引起密度的变化，即

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT \quad (2-3)$$

密度的相对变化率为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} dT = \kappa_p dp - \alpha_v dT \quad (2-4)$$

式中，

$$\kappa_p = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p}$$

称为**等温压缩率**，即在温度不变时，压强每增加 1 单位所引起的密度变化率，其单位为 Pa^{-1} ；也称为**体积压缩率**。其中， $v = \frac{1}{\rho}$ ，称为流体的**比体积**。

$$\alpha_v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{V_c} \frac{\partial V_c}{\partial T}$$

称为体膨胀系数，它表示压强不变时，温度每增加 1 单位所引起的密度变化率（或体积变化率），其单位为 K^{-1} 。

另外，因体积压缩率通常较小，工程上常将 $\frac{1}{\kappa_p}$ 单独进行定义，即

$$E = \frac{1}{\kappa_p} \quad (2-5)$$

式中， E 称为体积模量，也称弹性模量 (Modulus of Elasticity)，SI 制中的单位为 Pa (帕斯卡)，即与压强单位相同。书末附录 A 给出了常见流体的 E 值。

2. 流体的可压缩性

从前面的讨论可以看到，流体在压强的作用下，其体积或密度可以改变，这一性质称为流体的可压缩性 (Compressibility)；而流体在温度改变时其体积或密度可以改变的性质，则称为流体的热膨胀性。

液体一般很难压缩，例如当压强为 1 ~ 500atm (1atm = 101325Pa，即一个标准大气压)、温度为 0 ~ 20°C 的范围内，每增加 1atm，水的体积只被压缩 0.05‰。其他液体的情况与之相近。在工程常用压强范围内，实际上可以认为液体是不可压缩的。

温度升高时液体的体积略有膨胀，但变化很小。试验测定，1atm 下，在 10 ~ 20°C 范围内，温度每升高 1°C，液体的体积增加约 0.15‰。温度较高时，体积膨胀也不超过 1‰。实际工程计算中，除特殊场合外，一般不考虑液体体积变化。

气体分子间距较大，彼此间的引力很小，当压强或温度发生变化时，其体积（或比体积）、密度等都相应地发生变化。对于理想气体，这种变化关系可用理想气体状态方程表示：

$$pV_m = R_0 T \quad (\text{对 1kmol 气体}) \quad (2-6a)$$

$$pv = RT \quad (\text{对 1kg 气体}) \quad (2-6b)$$

或

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2-6c)$$

式中， V_m 表示每千摩尔气体的体积； R_0 为摩尔气体常数，即单位质量的气体、温度升高 1K 时对外所做的膨胀功， R_0 的值一般用 8.314kJ/(kmol·K)； R 为具体气体常数，单位为 J/(kg·K)， $R = \frac{R_0}{M_0}$ ， M_0 为相对分子质量。

式 (2-6c) 给出了气体密度的另一种测量方法，可以看出，通过对容器内的气体压强和温度的测量（通常比直接测量气体的质量和容积更便利），就可以计算出气体的密度。

此外，由于任何 1kmol 气体在标准状态 (1atm、0°C) 时占有的体积为 22.4m³，故单一气体在标准状态时的密度 ρ_0 (kg/m³) 为

$$\rho_0 = \frac{M_0}{22.4} \quad (2-7)$$

式中， M_0 为气体的相对分子质量。对于均匀混合性气体，在标准状态时的密度则可以用下

式计算:

$$\rho_{0m} = \sum_{i=1}^m x_i \rho_{0i} = \sum_{i=1}^m \frac{x_i M_{0i}}{22.4} \quad (2-8)$$

式中, x_i 为第 i 种组分的体积分数; M_{0i} 为第 i 种组分的相对分子质量。

于是, 在任意压强和温度时, 气体的密度为

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{1}{1 + t/273.15} \quad (2-9)$$

式中, p 为气体的绝对压强, 单位为 atm; T 为气体的热力学温度, 单位为 K; t 为气体的摄氏温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; $p_0 = 1 \text{ atm}$; $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 。

【例 2-1】 在一般工程领域, 干空气 (近似按氧气与氮气体积比 21:79 处理) 可视为理想气体。试分别求出其在 1 atm 和 5 atm (均指绝对压强) 下, 0°C 、 25°C 、 250°C 、 1000°C 时的密度。

解: 应用式 (2-8), 当氧气与氮气按体积比 21:79 混合时, 在标准状态时的密度为

$$\rho_0 = \left(\frac{32}{22.4} \frac{21}{100} + \frac{28}{22.4} \frac{79}{100} \right) \text{kg/m}^3 = 1.288 \text{kg/m}^3$$

再按式 (2-9), 代入数据后计算可得下表:

密度/(kg/m^3)		温度			
		0°C	25°C	250°C	1000°C
压强	1 atm	1.288	1.180	0.672	0.276
	5 atm	6.438	5.898	3.361	1.381

由此可见, 气体的密度随压强和温度的变化而有较大的改变。另外, 此例对空气成分进行了简化处理, 故所得 1 atm、 0°C 时的密度与实测值 1.293kg/m^3 稍有差异。

3. 不可压缩模型

对流体进行力学分析时, 若密度或比体积为常数, 则可使分析计算过程大为简化。前已述及, 在工程常用压强、温度条件下, 液体几乎都可视为密度恒定的介质, 简称为不可压缩流体。对于气体, 也有很多工程问题是在压强和温度变化不太大 (压强变化小于 0.1 atm , 温度变化小于 1 K) 或流速不太高 ($< 70 \text{ m/s}$) 的条件下进行, 这时气体的压缩程度很小, 为了简化, 也可忽略其密度变化从而作为不可压缩流体处理, 可用始末两状态的平均密度或平均比体积来考虑实际胀缩程度的影响。这种简化处理的概念称为流体的不可压缩模型 (Incompressible model)。

当然, 随着流速的提高或压降增大, 气体压缩性的影响变得不可忽略, 这时不能再使用不可压缩模型, 而应按可压缩气体流动问题来处理。

2.2 流体的分散性与连续介质假设

1. 流体的分散性 (Dispersibility)

相对于固体而言, 流体分子间的联系比较松散, 引力较小, 自由运动比较强烈。例如,