



普通高等教育“十二五”规划教材
卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材
海军院校重点教材

流体力学

LIUTI LIXUE

主 编 张志宏 顾建农
副主编 刘巨斌 王 冲
卢再华 邓 辉



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材
海军院校重点教材

流 体 力 学

主 编	张志宏	顾建农
副主编	刘巨斌	王 冲
	卢再华	邓 辉

科 学 出 版 社

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书共9章,内容包括:流体及其物理性质、流体静力学、流体运动的基本概念与基本方程、不可压缩黏性流体管内流动基础、不可压缩黏性流体外部流动基础、相似理论基础、低速机翼理论基础、不可压缩理想流体平面势流、波浪理论基础。各章均有适量的例题、思考题与习题,并附有习题答案。

本书引入身边的流体力学现象、科学家的生平事迹和最新的科研成果,融科学性、知识性、趣味性于一体,突出基础性和通用性要求,编排内容深入浅出,承上启下,知识点、例题、思考题、习题环环相扣,注重理论与实际相结合,强调学以致用。

本书可作为海洋、造船、兵器、机械、动力、水利、环境、土木、暖通、给排水等工程专业本科生的教材,也可供相关专业的研究生和从事教学、科研及工程技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张志宏,顾建农主编. —北京:科学出版社,2015.2

普通高等教育“十二五”规划教材

卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材

海军院校重点教材

ISBN 978-7-03-043169-1

I. ①流… II. ①张… ②顾… III. ①流体力学-高等学校-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 018876 号

责任编辑:王雨舸/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市新华印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2015年1月第 一 版 印张:16 1/2

2015年1月第一次印刷 字数:403 200

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是参考教育部力学基础课程教学指导委员会制订的《流体力学课程教学基本要求》，在编者长期的教学实践经验积累的基础上编写而成。本书具有以下特点：

(1) 突出特色性。流体力学作为理论性和实践性都很强的专业基础课程，本书注重引入流动的工程实际问题 and 典型的科研成果，注重引入身边的流体力学现象，注重引入科学家的生平事迹和科学研究的思想方法，力求做到理论与实际相结合，突出课程特色，以增强教学的针对性、有效性和趣味性。

(2) 强调基础性。本书适用于 40~60 学时的教学安排。考虑到大多工科学生只有高等数学、大学物理和理论力学的基本知识，因此在介绍流体力学基本理论时力求做到物理概念清晰、数学推演简明，便于课后自学，在教材编排时尽量做到语言简练、深入浅出，避免引入张量和复变函数等复杂数学内容。

(3) 兼顾系统性。在强调基础性的同时，还兼顾教材内容的系统性。知识点、重难点、例题、思考题、习题紧密联系，环环相扣。强调学以致用，能够利用流体力学基本原理对典型工程流动问题进行分析和计算。教材中加“*”号的部分内容，具有相对独立性，既可作为提高之用，又可根据实际学时取舍。

参加本书编写的有：教育部高等学校力学基础课程教学指导委员会委员、海军工程大学理学院力学系张志宏教授（第 1、2、3、9 章）、顾建农教授（第 4、5、7 章）、刘巨斌副教授（第 6、8 章）。本书由张志宏、顾建农制订编写大纲，张志宏负责统稿。海军工程大学的郑学龄、王冲、卢再华、邓辉、孟庆昌和海军航空工程学院的原渭兰、贾忠湖等老师也参加了本书的部分编写工作，并提出了许多有益的建议，在此深表谢意！

对于选用本书的高等学校教师，编者可以提供本书的习题解答和基本的 PPT 电子教案。为配合本书的教学，另配有《流体力学学习指导》、《流体力学实验》系列教材可供选用。

由于编者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，欢迎读者批评指正。

E-mail: zhangzhihong_999@163.com

编 者

2014 年 10 月

目 录

第1章 流体及其物理性质	1
1.1 流体力学的任务和研究对象	1
1.1.1 流体力学的任务	1
1.1.2 流体力学的研究对象	2
1.2 流体力学的发展概况和研究方法	3
1.2.1 流体力学的发展概况	3
1.2.2 流体力学的研究方法	4
1.3 流体质点与连续介质假定	5
1.4 流体的密度	6
1.5 流体的压缩性和膨胀性	7
1.5.1 流体的压缩性	7
1.5.2 流体的膨胀性	8
1.5.3 可压缩流体和不可压缩流体	8
1.6 流体的黏性	9
1.6.1 流体黏性的表现	9
1.6.2 牛顿内摩擦定律	9
1.6.3 动力黏度与运动黏度	11
1.6.4 理想流体和黏性流体	11
1.7 流体流动性	12
思考题—	13
习题—	13
第2章 流体静力学	15
2.1 作用在流体上的力	15
2.1.1 表面力	15
2.1.2 质量力	16
2.2 流体静压强及其特性	16
2.3 流体平衡微分方程及其积分	19
2.3.1 流体平衡微分方程	19
2.3.2 重力场中的流体静力学基本方程	21
* 2.3.3 可压缩流体中的压强分布	23
2.4 液柱式测压计	25
2.4.1 绝对压强和相对压强	25
2.4.2 单管测压计	26

2.4.3 U形管测压计	26
2.4.4 倾斜式微压计	28
* 2.5 压敏元件测压计	31
2.5.1 布尔登压力表	31
2.5.2 压力传感器	32
2.6 静止液体作用在平面上的总压力	32
2.7 静止液体作用在曲面上的总压力	37
2.7.1 二维曲面	37
2.7.2 三维曲面	41
2.7.3 潜体和浮体	42
思考题二	45
习题二	45
第3章 流体运动的基本概念与基本方程	48
3.1 流场及其描述方法	48
3.1.1 拉格朗日法	49
3.1.2 欧拉法	50
3.2 流体运动的基本概念	50
3.2.1 流体质点运动的加速度	50
3.2.2 迹线和流线	52
3.2.3 流管、流束与总流	55
3.2.4 流量与平均流速	55
3.2.5 缓变流与急变流	56
3.3 流体流动分类	56
3.3.1 可压缩流动与不可压缩流动模型	57
3.3.2 定常流动与不定常流动模型	57
3.3.3 一维、二维与三维流动模型	58
3.3.4 重力流体与非重力流体模型	58
3.3.5 黏性流体与理想流体模型	58
3.3.6 有旋流动与无旋流动模型	59
3.3.7 层流与湍流模型	61
3.3.8 亚声速、跨声速与超声速流动模型	61
3.3.9 其他模型	61
3.4 常用的流动分析方法	62
3.4.1 基本的物理定理	62
3.4.2 系统与控制体分析方法	63
3.4.3 微分与积分方法	64
3.4.4 量纲分析方法	64

3.5 连续性方程	65
3.5.1 微分形式的质量守恒方程——连续性微分方程	65
3.5.2 积分形式的质量守恒方程——定常总流的连续性方程	67
3.6 理想流体运动微分方程及其积分	68
3.6.1 理想流体的运动微分方程	68
3.6.2 伯努利积分	72
3.6.3 拉格朗日积分	73
3.7 伯努利方程	74
3.7.1 流线伯努利方程的物理意义和几何意义	74
3.7.2 流线伯努利方程的应用	75
3.7.3 总流伯努利方程及其应用	77
3.8 某些典型现象的伯努利方程解释	81
3.8.1 空泡形成机理及其危害	81
3.8.2 超空泡水中兵器	83
3.8.3 舰船水压场	86
3.8.4 船吸现象	87
3.9 流体速度测量	89
3.9.1 普通测速方法	89
3.9.2 热线测速仪	89
3.9.3 激光多普勒测速仪	91
3.9.4 粒子图像测速技术	93
3.10 动量方程	94
3.10.1 定常不可压缩总流的动量方程	95
3.10.2 定常不可压缩总流动量方程的适用条件和使用方法	97
3.11 动量矩方程	101
3.12 黏性流体运动微分方程	104
3.12.1 纳维-斯托克斯方程	104
3.12.2 初始条件和边界条件	105
3.12.3 纳维-斯托克斯方程应用举例	107
思考题三	112
习题三	113
第4章 不可压缩黏性流体管内流动基础	117
4.1 管内流动的层流与湍流	117
4.1.1 雷诺实验	117
4.1.2 层流与湍流流动的特点	118
4.1.3 管内流态的判别	119
4.2 黏性总流伯努利方程与水头损失	119

4.2.1 黏性总流伯努利方程	119
4.2.2 沿程损失的概念与计算	120
4.2.3 局部损失的概念与计算	121
4.3 简单管路	123
4.4 复杂管路	125
4.4.1 串联管路	125
4.4.2 并联管路	127
4.4.3 分支管路	128
思考题四	130
习题四	130
第5章 不可压缩黏性流体外部流动基础	133
5.1 边界层概念	133
5.1.1 边界层概念的提出	133
5.1.2 边界层的特点	135
5.2 平板摩擦阻力计算方法	137
5.2.1 平板层流边界层摩擦阻力计算	137
5.2.2 平板湍流边界层摩擦阻力计算	140
5.2.3 平板混合边界层摩擦阻力计算	140
5.3 边界层分离与压差阻力	142
5.3.1 曲面边界层的分离现象	143
5.3.2 压差阻力	146
5.3.3 减阻方法	147
5.4 卡门涡街	148
5.4.1 卡门涡街	148
5.4.2 卡门涡街诱发振动	149
思考题五	151
习题五	151
第6章 相似理论基础	153
6.1 量纲分析方法	153
6.1.1 量纲的概念	153
6.1.2 基本量纲与导出量纲	154
6.1.3 量纲一致性原理	154
6.1.4 π 定理	155
6.2 流动相似与相似准则	158
6.2.1 流动相似	158
6.2.2 相似准则	161
6.3 模型实验与相似原理	162

6.3.1 模型实验	162
6.3.2 实验设备简介	163
6.3.3 相似原理	165
思考题六	169
习题六	170
第 7 章 低速机翼理论基础	171
7.1 机翼的几何参数	171
7.1.1 翼型的几何参数	171
7.1.2 美国 NACA 翼型	172
7.1.3 机翼的平面形状与翼型沿展向配置	173
7.2 翼型的低速流体动力特性	174
7.2.1 升力产生的原理	174
7.2.2 翼型的升阻力特性	176
7.2.3 翼型的力矩特性	178
7.3 有限翼展直机翼的低速流体动力特性	180
7.3.1 绕有限翼展机翼流动的特点	180
7.3.2 下洗现象	181
7.3.3 有限翼展机翼的升力及诱导阻力	182
思考题七	183
习题七	183
第 8 章 不可压缩理想流体平面势流	185
8.1 速度环量及理想流体中的旋涡定理	185
8.1.1 速度环量	185
8.1.2 斯托克斯定理	185
8.1.3 涡线与涡管	187
8.1.4 汤姆孙定理	189
8.1.5 亥姆霍兹定理	189
8.2 不可压缩理想流体流动的基本方程和边界条件	190
8.2.1 基本方程	190
8.2.2 初始条件和边界条件	190
8.2.3 方程的特点	191
8.3 外部势流的基本方程和边界条件	191
8.3.1 基本方程	191
8.3.2 以速度势形式表示的边界条件	192
8.3.3 势流基本方程的特点	192
8.3.4 速度势方程的求解方法	193
8.4 平面势流的基本方程、边界条件、流函数与基本解	193

8.4.1	平面势流的基本方程、边界条件	193
8.4.2	流函数	193
8.4.3	平面势流的基本解	196
8.5	简单势流叠加举例	200
8.5.1	兰金半体绕流	200
8.5.2	兰金体绕流	202
8.5.3	无环量圆柱绕流	203
8.5.4	有环量圆柱绕流	206
8.5.5	库塔-儒可夫斯基升力定理	208
8.6	附加质量及附加惯性力	209
8.6.1	附加质量和附加惯性力的概念	209
8.6.2	附加质量系数	210
8.6.3	附加质量的测量	211
8.6.4	简单物体附加质量的计算	212
8.7	二维对称物体绕流的数值计算	212
8.7.1	线段上均匀分布的线源	212
8.7.2	对称机翼绕流的数值计算	213
8.7.3	有限差分方法简介	214
8.7.4	有限元法的基本思想	217
思考题八		222
习题八		222
第9章	波浪理论基础	224
9.1	波浪的概念	224
9.2	波浪运动问题的数学描述	225
9.2.1	波浪运动的基本方程	226
9.2.2	波浪运动的边界条件	227
9.2.3	波浪运动问题的数学提法及其简化	228
9.3	微幅波的速度势	229
9.4	微幅波的波动要素	230
9.4.1	波长和波数	231
9.4.2	周期和圆频率	231
9.4.3	波速	231
9.5	微幅波液体质点的运动特性与压强分布	232
9.5.1	液体质点的运动速度	233
9.5.2	无限水深行进波中液体质点的运动轨迹	233
9.5.3	有限水深行进波中液体质点的运动轨迹	234
9.5.4	波动液体中的压强分布	236

9.6 波能及其传递	237
9.6.1 波能	237
9.6.2 波能的传递	238
9.7 波群和群速度	239
9.8 兴波阻力概念	241
9.9 不规则波的概念	242
思考题九	247
习题九	247
习题答案	248
参考文献	252

第1章 流体及其物理性质

引言 本章介绍流体力学的任务和应用范围、流体力学的研究对象以及流体中液体和气体的特点;简述流体力学的发展概况,提出流体力学中的理论分析、实验观测和数值计算三种研究方法;引入流体质点概念,作出连续介质假定,将通常研究的流体视为连续介质;通过介绍流体的密度、压缩性和膨胀性,引出可压缩流体和不可压缩流体概念;通过介绍流体的黏性和牛顿内摩擦定律,引出理想流体和黏性流体概念。

通过本章学习,可使读者了解流体力学的基本任务和应用范围,并为后续各章节内容学习奠定基础。

1.1 流体力学的任务和研究对象

1.1.1 流体力学的任务

从生产到生活,流体都与我们密切相关。自然界中,从包围着整个地球的大气到江河湖海中的水,都是流体,可以说,人类生活在一个被流体包围着的世界里。

流体力学是研究流体的平衡(静止或相对静止)和宏观运动规律以及流体与周围物体之间相互作用的科学。流体力学属于力学的一个分支。

流体力学的主要任务有两个:一是研究流体的速度分布和压强分布;另一个是研究流体与固体之间的相互作用力问题。

凡是有流体存在的地方,就有流体力学问题。自然界中处处存在流体,因此,流体力学具有广泛的应用。航空航天、造船航运、动力机械、海洋气象、交通运输、水利电力、石油化工、环境保护、土木建筑、冶金工业、医学工程 and 水中兵器等领域无不涉及流体力学问题。

在航空与造船工业中,各种飞行器与舰艇的外形设计与推进问题的解决都需要依靠流体力学理论,近代火箭技术与宇航事业的发展对流体力学又提出了一系列复杂的问题和要求。在动力机械方面,为了提高水轮机、蒸汽透平、燃气轮机、水泵与压气机的功率和效率,需要利用流体力学理论设计形状合理、性能良好的转子叶片、导流片及流道。在机械工业中,润滑、冷却、液压与液力传动、发动机中的燃烧、进排气管中的流动与增压问题、气力输送与气动控制问题的解决,都离不开流体力学的原理。海洋工程中的波浪、大洋环流与潮汐以及气象中的气旋、环流与季风等都存在大量的流体力学问题,即使天文方面,研究星云的运动及其相互作用,并用来解释星云、星球和宇宙的起源与演化,也运用了流体力学理论。在铁路和公路的运输中,列车和汽车的空气阻力、列车制动、风流引起的桥梁振动、隧道与地下铁道中的通风换气等方面也存在重要的流体力学问题。在水利工程中,水利枢

纽、水库大坝、水力发电站的设计与建造、洪峰的预报、河流、泥沙和渗流对水工建筑物的作用等都与流体力学问题紧密地结合在一起。石油化学工业中的流体力学问题也很多,如油、气、水的渗流问题,油、气的自喷、抽吸和输送问题,以及各种化工设备和管道中流体的流动,不仅伴随着化学反应,而且还存在传质与传热的流动问题。在环保工程中,对空气和水环境的监测和预报,大气和水污染的迁移、扩散及对周围环境的侵蚀与影响,空气中液滴与液体中颗粒、气泡的运动等都存在繁多的流体力学问题。土木建筑中的给水、排水和采暖、空调也存在许多流体力学问题。在冶金工业中,也会遇到液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。在医学与生物工程中,心血管与呼吸系统疾病的防治、人造心脏、心肺机与呼吸器等的设计都和流体力学有着密切的关系。在水中兵器方面,鱼雷、导弹的出入水及水中弹道控制、利用舰船尾流信息发展的鱼雷制导技术、利用超空泡技术研制的水下高速武器(超空泡鱼雷和超空泡射弹)、利用舰船水压场信号特征研制的水雷水压引信等都应用到了大量的流体力学理论和知识。

流体力学还在广泛的工程领域中向纵深发展,并与其他学科结合、交叉与渗透,形成了许多新的分支和边缘学科,如天体物理流体力学、稀薄气体动力学、电磁流体力学、多相流体力学、环境流体力学、地球流体力学、生物流体力学、物理化学流体力学、非牛顿流体力学和流变学等。

总之,现代工业和高新武器装备的进步与流体力学的发展是密不可分的。流体力学在推动社会进步和发展方面做出过重大贡献,今后仍将在科学技术与国防建设的各个领域中发挥更大的作用。

1.1.2 流体力学的研究对象

流体力学研究的对象是流体。什么是流体呢?顾名思义,流体就是容易流动的物体。从流体的力学特征看,流体是一种受到任何微小剪切力都能连续变形的物质。固体则不同,一般情况下,当受到剪切力作用时,仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化。由此可见,易流动(易变形)性是流体的一大特征。

流体和固体具有上述不同性质是由于分子结构和分子间的作用力不同造成的。流体分子间的作用力小,分子运动强烈,从而决定了流体具有易流动、不能保持一定形状的特性。

流体按其状态不同又可分为液体和气体,液体和气体除具有上述的共同特性外,还有以下不同特性:

气体的分子间距较大,在 0°C 、1 个标准大气压下,气体的平均分子间距约为 $3.3 \times 10^{-9} \text{ m}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-10} \text{ m}$,分子间距比分子平均直径约大 10 倍,因此分子间的吸引力很小,气体分子可以自由运动,故它容易压缩、变形和流动。此外气体没有一定的体积,也没有一定的形状,总是充满容纳它的容器。

液体的分子间距和分子的有效直径差不多相等,为气体分子间距的 $1/10$ 左右,故液体分子间的吸引力较大,所以,液体分子不能像气体分子那样自由运动,液体的压缩性和流动性不如气体。此外,液体具有一定的体积,并呈容器的形状。当容器的容积大于液体的体积时,液体不能充满容器,在重力的作用下,液体总保持一个自由表面(液面)。

1.2 流体力学的发展概况和研究方法

1.2.1 流体力学的发展概况

同许多其他学科一样,流体力学的发展经历了漫长的岁月,人类最早对流体的认识是从供水、灌溉、航行等方面开始的。远在两三千年前,在同自然界的长期斗争中,人们已经开始建造了水利工程和最简单的水利机械。例如,在我国战国时代,李冰父子修建了都江堰水利工程,用于防洪和灌溉;隋朝时开凿了贯通中国南北、北起涿郡(北京)、南至余杭(杭州)的大运河,对构造南北交通发挥了巨大作用;此外古代还发明了一些以水力为动力的简单机械,用作碾米磨面等。由于没有相应的数学和机械知识,那时关于流体的认识,只是从实践中总结出来的经验性的东西。然而,正是这些经验的积累,为流体力学的发展奠定了基础。

流体力学的最早文献中记载着阿基米德(Archimedes)的贡献。他是古希腊的数学家和发明家,在公元前250年就发表了《论浮体》一文,精确地给出了“阿基米德定律”,从而奠定了物体平衡和沉浮的理论基础。文献中还记载着罗马人在公元前4世纪至公元1世纪修筑的复杂的水利系统。但在其后1000多年中,即在漫长的中世纪,流体力学研究几乎没有新的进展。

15世纪初,流体力学研究的又一次繁荣是伴随着欧洲文艺复兴而兴起的。其中有代表性的是伽利略(Galilei)用实验方法研究在流体中运动物体的阻力,它标志着实验流体力学的开始。到了18世纪,由于欧洲资本主义蓬勃兴起,自然科学的发展突飞猛进,流体力学也有了长足进步。流体力学最基本、最主要的理论都在这时期建立起来了,并涌现出一批杰出人物,他们为流体力学的发展做出了巨大的贡献。其中包括牛顿(Newton)、伯努利(Bernoulli)、欧拉(Euler)和达朗贝尔(d'Alembert)等。此外,这一时期实验流体力学也发展迅速。在这以后,流体力学两种不同的研究方法——理论和实验方法,沿着两个不同的方向各自发展起来,形成了关于无黏性流体的理论流体力学(也称理想流体动力学)和关于真实流体的实验流体力学(也称水力学)。

理想流体动力学是从理论上或数学上研究理想的、无摩擦的流体运动。它将流体及其受力条件理想化,忽略次要因素,建立描写理想流体运动的基本方程,如1738年伯努利建立的能量方程和1755年欧拉建立的理想流体运动方程。水力学是从实际应用或实验方面研究真实流体的运动,特别是水的运动,由于流动的复杂性,对尚不能从理论上解决而工程实际应用中又经常遇到的问题,采取实验先行的办法,对理论不足部分反复实验,总结规律,得到经验公式和半经验公式。在这方面具代表性的是尼古拉兹(Nikuradse)、穆迪(Moody)、哈根(Hagen)、泊肃叶(Poiseuille)等。1821年纳维(Navier)推广了欧拉的理想流体运动方程,建立了黏性流体运动的方程,但方程中只含有一个黏性常数。1845年,斯托克斯(Stokes)改进了纳维的方程,得到了有两个黏性常数的黏性流体运动方程。这组方程后称纳维-斯托克斯方程,它是流体力学中最基本的方程组。1883年,英国力学家雷诺(Reynolds)通过实验证明了实际流体存在着两种不同的流动状态:层流和湍流。流体流动的能量损失规律与流体流动状态是密切相关的。在此期间,指导实验的相似理论也得到重要发展。例如,雷诺提出了一个无量纲数(雷诺数),佛鲁德建立了模型实验的相似法则,瑞利建议采用量纲分析方法等。

19 世纪,理想流体动力学和水力学得到了进一步发展,因而更具科学性,一些描述流体运动的基本方程以及当时得到的一些实验结果至今仍在使用。

20 世纪初,在理想流体动力学和水力学空前发展的条件下,人们试图将二者统一。1904 年,德国数学家普朗特(Prandtl)发表了一篇著名的论文“论黏性很小的流体的运动”,在论文中他引入了边界层的概念,为流体力学理论和实验的统一奠定了基础。普朗特的观点是:在流体接近固体边界的一流体薄层内(边界层),摩擦力起主要作用;在边界层以外,流体运动更像无摩擦的理想流体。这个相当简单的概念为理想流体动力学和水力学的统一提供了条件,所以人们称普朗特为近代流体力学的奠基人。

由于航空、航天、涡轮机等工业的发展,空气动力学和气体动力学取得了极大的成就,特别是库塔与儒可夫斯基建立了机翼理论,使得流体力学理论进一步完善。空气动力学和气体动力学成为流体力学在 20 世纪迅速发展的两个主要分支。由于航海和水中兵器的发展,水动力学也取得了许多重要成果。

从流体力学的发展过程可看出,它的产生和发展,始终是与社会实践紧密地联系在一起的。在现代科学技术高度发展的情况下,随着电子计算机的出现,计算技术被引入到流体力学领域,使以前因计算过于繁杂而影响进一步研究的流体力学问题逐步得以解决,计算流体力学在今天已成为继理论分析和实验方法之后研究流体力学的又一种重要方法。

1.2.2 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法分三个方面,它们的关系是相互配合、互相补充的。

1. 理论分析方法

理论分析方法的主要步骤是:建立简化的数学模型,即根据流动问题的特点,作出一定的假定,对一般的流体力学方程组和初始条件与边界条件进行适当的简化;用数学分析方法求此简化后的初值问题或边值问题,得到该数学问题的分析解;选取适当的算例,将分析解的计算结果与其他方法得到的相应结果进行比较,以检验简化模型的合理性。

理论分析方法的优点是:理论分析解明确地给出了各种物理量与流动参量之间的关系,可以揭示流体运动的本质特性和规律,因此具有较好的普适性。其缺点是:数学处理困难,能获得分析解的问题有限。

2. 实验方法

到目前为止,能完全用理论分析方法解决的实际流动问题仍然有限,大量工程中的复杂流动问题要靠实验或实验与理论相结合的方法来解决。流体力学实验方法的主要步骤是:在相似理论的指导下,在实验室内建立模型实验装置;用实验设备观察流动现象;用流体测量仪器测量模型实验中的流动参数;处理和分析实验数据并将它归纳为经验公式。典型的流体力学实验装置有风洞、水洞、水槽、水池等;测量技术有:热线、激光测速;粒子图像、迹线测速;高速摄影、全息照相;压力、密度和温度测量等。现代测量技术在计算机、光学和图像处理技术的配合下,在提高空间分辨率、测量精度和实时测量方面已取得长足进步,为研究复杂流场的精细结构提供了有效手段。

实验方法的优点是:能直接解决工程实际中的复杂问题,能发现流动中的新现象和新原理,它的结果可以作为检验其他方法是否正确的依据。它的缺点是:对不同情况,需作不同的实验,费钱费时,而且所得结果的普适性较差。

3. 数值方法

随着计算机技术突飞猛进的发展,对于过去某些无法解决的流体力学偏微分方程,现在可以用计算机数值方法求解。数值方法的主要步骤是:对一般的流体力学方程组结合初始条件和边界条件进行必要的简化或改写;选用适当的数值方法,对简化或改写后的初值问题或边值问题进行离散;编制程序,选取算例,进行具体计算;将计算结果与实验或理论解析结果进行比较。常用的数值方法有:有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等,数值方法已成为流体力学现代分析手段中发展最快的方法之一。目前,商业化的大型工程计算软件已成为研究和计算工程流动问题的有力武器。

数值方法的优点是:能够计算理论分析方法无法求解的流动问题,能够模拟多种工况的流动问题,数值方法比实验方法省时省钱。它的缺点是:数值方法毕竟是一种近似求解方法,它的结果仍应与实验结果或其他理论分析结果进行比较,数值方法的适用范围受数学模型的正确性、计算精度和计算机性能所限制。

以上介绍的三种方法各有优缺点,只有将它们结合起来才能适应现代流体力学研究和工程应用的需要。学习流体力学应注意理论与实践结合,在掌握坚实的流体力学基本理论的基础上,要善于观察和思考,勤于动手,掌握基本的流体力学实验技能,并逐步培养应用和编制流体力学工程软件的能力。

1.3 流体质点与连续介质假定

从微观角度看,流体与其他物质一样,都是由大量分子组成的,而分子之间存在着间隙,因此,流体并不是连续分布的物质。但是,流体力学所要研究的并不是个别分子的微观运动,而是研究由大量分子组成的流体的宏观运动。

流体的宏观运动由大量分子运动的统计平均值来体现,正因为如此,在流体力学中,取流体质点来代替流体的分子作为研究流体的基元。流体质点可以认为是微观上“足够大”、宏观上“足够小”的流体微团。所谓微观上“足够大”,指的是流体微团内包含有大量的流体分子,这些分子物理参数的统计平均值可以作为流体的宏观物理量;所谓宏观上“足够小”,指的是流体微团的体积相对于工程流动问题的特征尺寸来说非常小,小到可以认为只是空间上的一个“点”。所以,流体微团也称为流体质点,其特点是“既大又小”。

把流体看成是由流体质点组成的连续介质,流体质点之间没有间隙地在空间连续分布,这就是流体的连续介质假定。只要我们在研究流体运动时所取的流体微团足够小,但它又包含了足够多的流体分子,从而使各个物理量的统计平均值有意义,我们就可以不去研究无数分子运动的瞬时状态,而只研究由流体质点所代表的流体运动的宏观属性。此外,将流体视为连续介质来处理,则表征流体宏观属性的物理量例如密度、速度、压强、温度、黏度等在流体中也是连续变化的。这样,可将流体及其各物理量看成时间和空间坐标的单值连续可微函数,从而可以利用微分方程等数学工具来研究流体的平衡和运动规律。

连续介质假设是流体力学的根本假设之一,我们依据了这个假设,才能把微观问题转化为宏观问题来处理。对于大部分工程技术中的流体力学问题,该假设都是适用的。例如在标准状况下, 1 mm^3 的气体中有 2.7×10^{16} 分子,若取 0.01 mm 作为流体质点的特征尺寸,则在体积为 10^{-6} mm^3 的流体质点中,还包含有 2.7×10^{10} 个分子,完全能得到与个别分子运动无关的统计平均值。另一方面 0.01 mm 相对于一般工程问题又是一个非常小的量,完全可以将其视为是一宏观无穷小量。但对一些特殊问题,该假设不适用。例如,火箭在高空非常稀薄的气体中飞行时,如在 120 km 高空处空气分子的平均自由程为 1.3 m ,与火箭的特征尺寸比较具有相同的数量级,此时连续介质假定不再合理,因此必须舍弃宏观的连续介质的研究方法,代之以分子动力论的微观方法。类似地,对于高真空泵与高真空技术中的流体,或者含有空泡的液体与高速渗气水流,也不能采用连续介质力学方法来研究这些问题。此外,在存在流动间断面——超音速气流中激波面的情况下,由于激波面的厚度与分子平均自由程具有相同数量级(为 $10^{-4} \sim 10^{-5}\text{ mm}$),因而可认为激波面前后的气流参数发生突变,此时连续介质假定也不再成立。本书只研究连续介质的运动规律。

1.4 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,流体中某点的密度就是该点单位体积流体的质量,它反映了流体在空间某点的质量密集程度。若某点的流体体积为 ΔV ,其中的流体质量为 Δm ,则该点的密度

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

式中 ρ 表示单位体积流体所具有的质量(kg/m^3)。

这里 $\Delta V \rightarrow 0$,应从物理上理解为体积缩小为无穷小的流体微团,从宏观角度看,该点的体积同整个流场的流体体积相比是完全可以忽略不计的;但从微观角度看, ΔV 内必须包含足够的流体分子,而不失去把流体当成连续介质处理的基础。

在均质流体中,空间各点的密度相同,那么流体密度为

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

式中 m 为流体的质量(kg), V 为流体的体积(m^3)。

密度 ρ 取决于流体的种类、温度和压强。液体的密度随温度的改变呈现不大的变化,压强对密度的影响几乎也可忽略。表 1-1 列出了水、空气和水银这三种最常用流体在 1 个标准大气压下不同温度时的密度。表 1-2 列出了在 1 个标准大气压下几种常用流体的密度。

表 1-1 不同温度时水、空气和水银的密度/(kg/m^3)

流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.37
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.946
水银	13 600	13 570	13 550	13 500	13 450	13 400	13 350