

“十二五”普通高等教育本科规划教材

流体力学

贾宝贤 周军伟 主编

Fluid
Mechanics



化学工业出版社

“十二五”普通高等教育本科规划教材

流体力学

贾宝贤 周军伟 主编

Fluid

Mechanics



化学工业出版社

·北京·

本书内容分为基础和应用,具体内容包括:流体的性质、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学、旋涡理论、势流理论、波浪理论、黏性流体力学基础、相似理论、黏性流体的一元流动、边界层理论、机翼理论等。各章均附有小结,配有适量的思考题和习题,并附参考答案。本书教学需要 60~80 学时,带*的内容可根据授课学时或专业需要进行选择。

本书适用于高等学校工科专业本科教学,可供船舶与海洋工程专业教学使用,也可供其他专业的本科生、专科生和研究生用作学习流体力学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/贾宝贤,周军伟主编. —北京:化学工业出版社,2014.1

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-18909-7

I. ①流… II. ①贾…②周… 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(2013)第 262632 号

责任编辑:杨 菁 李玉晖

文字编辑:杨欣欣

责任校对:徐贞珍

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19¼ 字数 497 千字 2014 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:42.00 元

版权所有 违者必究

前 言

流体力学是船舶与海洋工程专业的一门重要的技术基础课。一方面，它在专业培养目标中起到“承上启下”的作用，本专业许多后续课程要以它为基础；另一方面，随着海洋工程和高性能船舶技术的发展，在流体力学领域会有更多的问题需要解决。

笔者从教学实践中体会到，学生普遍感到流体力学这门课程内容多、概念抽象、理论性强，部分学生感到难学，尤其对基本理论的应用感到困惑。因此要想使学生学好流体力学这门课程，需要有一本内容深度适当、物理概念清晰、理论与应用相结合的教材。笔者在多年的教学中，先后用过不同版本的流体力学教材，使用中感到这些教材各有长处，便产生了把这些长处集成在一起的想法，于是形成了这本书。

基于专业实际需要，本书仅限于讨论不可压缩流体。本书略去了一些繁冗的数学推导和过于抽象的内容，尽可能从基本的物理定律和概念出发推导相关定理和基本方程；体现工科专业教材的特点，注意理论联系工程实际，同时对一些容易混淆的概念作了深入辨析。尽量做到结合专业特色，内容选取适当，通俗易懂，概念清晰，由浅入深，层次分明，前后呼应。每章小结给出了内容总结、重点、难点等，便于读者自学。全部授完本书的基本内容约需 60~80 学时。

在编写本书过程中，重点参考了国内船舶流体力学方面的教材，同时还参考了许多有关著作和不知作者姓名的网上文献，从中获益匪浅，在此谨向这些作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间短，书中缺点和不当在所难免，恳请读者给予批评指正，并期待着更加完善的版本问世。

编者

2013 年 9 月

主要符号的物理意义

a ——加速度、圆柱半径、振幅、离原点距离、拉格朗日变量	n ——转速、单位法向矢量、频率，角标代表法向分量
A ——面积、振幅	N ——功率
b ——宽度、弦长、拉格朗日变量	O ——坐标原点
B ——宽度	p ——压力
c ——波速、拉格朗日变量	p_0 、 p_a ——大气压、液面压力、环境压力
C ——常数、常量、系数、比尺	p_v ——真空度
C_L ——升力系数	p_{abs} ——绝对压力
C_R ——阻力系数	P ——总压力、力、功率
C_C ——收缩系数	q 、 Q ——流量、通量
d 、 D ——直径、阻力	r ——半径、矢径
e ——单位矢量，线变形速度	R ——气体常数、阻力、半径常量
E ——体积弹性模量、能量	s ——距离、曲线长度
f ——单位质量力、函数、面积、拱度	S ——面积
f_x 、 f_y 、 f_z ——单位质量力分量	t ——时间、温度、翼厚
F ——力、函数、面积	T ——热力学温度、周期
g ——重力加速度	U ——速度常量、质量力的势函数
G ——重量、重力	u 、 v ——速度变量
h ——深度、水深	v_∞ 、 v_0 ——来流速度
h_f ——沿程阻力水头损失	V ——体积、速度常量
h_j ——局部阻力水头损失	w_i ——下洗速度
h_w ——总水头损失	W ——复势、复函数、重力、功
H ——深度常量、波高	x 、 y 、 z ——直角坐标分量
i —— x 方向单位矢量	X ——复函数实部
I ——惯性矩	Y ——复函数虚部
j —— y 方向单位矢量	z ——复变量
J ——涡通量、螺旋桨进速系数	Z ——复势
k —— z 方向单位矢量	α ——角度、动能修正系数、攻角、椭圆长半轴
k ——系数、波数	α_T ——等温压缩系数
K ——卡门通用常数、单位长度上的偶极矩	β ——角度、等压热膨胀系数、动量修正系数、椭圆短半轴
l ——长度、翼展	γ ——重度、剪切变形速度
L ——长度、波长、混合长度、升力	δ ——微小量、边界层名义厚度
m ——质量	δ^* ——边界层排挤厚度
M ——力矩、偶极矩	ϵ ——位相角、线变形速度、湍

流度
 ζ ——复变换函数、波面、局部阻力系数
 η ——平面坐标分量、效率、布拉修斯无量纲自变量
 θ ——角度、极角、动能损失厚度
 κ ——修正系数
 λ ——沿程阻力系数、附加质量、展弦比
 μ ——动力黏度、流量系数
 ν ——运动黏度
 ξ ——平面坐标分量
 π ——圆周率

ρ ——密度
 σ ——面积、圆频率、机翼平面形状修正系数
 τ ——剪应力、角标代表切向分量、机翼平面形状修正系数
 φ ——势函数、流速系数
 Φ ——标量函数，势函数
 ψ 、 Ψ ——流函数
 ω ——角速度
 Ω ——涡量、湿水面积
 Γ ——速度环量
 Δ ——表面粗糙度

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学的研究对象及应用领域	1
1.2 流体力学的研究方法	2
1.2.1 实验模拟方法	2
1.2.2 理论分析方法	2
1.2.3 数值计算方法	3
1.3 流体的连续介质模型	3
1.3.1 流体的概念	3
1.3.2 连续介质模型	3
1.4 流体的密度和重度	4
1.5 流体的压缩性和热膨胀性	6
1.5.1 气体状态方程	6
1.5.2 压缩性和热膨胀性	6
1.5.3 可压缩流体和不可压缩流体	7
1.6 流体的黏性	7
1.6.1 黏性的表现	7
1.6.2 黏性的度量	8
1.6.3 温度对黏性的影响	8
1.6.4 黏性流体和理想流体	9
1.7 作用在流体上的力	10
本章小结	14
思考题	15
习题	15
第 2 章 流体静力学	17
2.1 流体静力学方程	17
2.2 流体平衡的一些要求	18
2.3 平衡流体的等压面	18
2.4 重力场中不可压缩流体的静压分布	20
2.5 测压计	21
2.5.1 液柱式压力计原理	21
2.5.2 几种常用的液柱式压力计	21
2.6 静止流体对平板的作用力	23
2.6.1 总压力的大小	23
2.6.2 总压力的作用点	24
2.7 静止流体对曲面的作用力	25
2.8 流体的浮力	28
2.8.1 阿基米德原理	29
2.8.2 物体在液体中的平衡与稳定性	30

本章小结	32
思考题	33
习题	34
第 3 章 流体运动学	37
3.1 描述流体运动的两种方法	37
3.1.1 拉格朗日法 (质点法)	37
3.1.2 欧拉法 (空间点法)	38
3.1.3 欧拉法中的质点加速度公式	39
3.1.4 质点导数	42
3.2 流场的几何特征描述	42
3.2.1 定常流场和非定常流场	42
3.2.2 均匀流动和非均匀流动	43
3.2.3 一维流动、二维流动和三维流动	43
3.2.4 流线、驻点、极限流线	44
3.2.5 流体质点的迹线	46
3.2.6 流束、流面和流管	47
3.2.7 总流、过流截面与流量	47
3.2.8 条纹线	48
3.3 流体的连续性方程	49
3.3.1 微分形式的连续性方程	49
3.3.2 微分连续性方程在其他坐标系中的形式	50
3.3.3 积分形式的连续性方程	51
3.4 流体微团的运动分析	52
3.4.1 流体运动的分解	52
3.4.2 无旋流动与有旋流动	56
3.5 速度势函数与流函数的概念	58
3.5.1 速度势函数	58
3.5.2 流函数	59
本章小结	61
思考题	62
习题	62
第 4 章 理想流体动力学	64
4.1 欧拉运动微分方程	64
4.2 拉格朗日积分方程	65
4.3 伯努利积分方程	67
4.3.1 伯努利积分的建立	67
4.3.2 伯努利方程的意义	69
4.3.3 伯努利方程的应用	70
4.4 动量定理及动量矩定理	77
4.4.1 动量定理	77
4.4.2 动量矩定理	78
4.4.3 动量及动量矩方程的应用	79
本章小结	85

思考题	87
习题	87
第 5 章 旋涡理论	92
5.1 旋涡运动的基本概念	92
5.1.1 涡线、涡管、涡量、涡通量	92
5.1.2 速度环量	93
5.1.3 斯托克斯定理	94
5.2 汤姆逊定理	96
5.3 拉格朗日定理	97
5.4 亥姆霍兹定理	98
5.5 旋涡的诱导速度	99
5.5.1 点涡	100
5.5.2 诱导速度公式	100
5.5.3 毕奥-沙伐尔定理	101
5.6 兰金组合涡	104
5.6.1 速度分布	104
5.6.2 压力分布	105
5.6.3 有自由面的情形	106
本章小结	106
思考题	108
习题	108
第 6 章 势流理论	111
6.1 势流理论概述	111
6.2 二维流动和流函数	112
6.3 几种简单平面势流的基本解	114
6.3.1 直匀流	114
6.3.2 点源(汇)	115
6.3.3 点涡	116
6.3.4 偶极子	117
6.3.5 叠加的例子	118
6.4 绕圆柱体的无环量流动 达朗贝尔谬理	119
6.4.1 绕圆柱体无环量流动的势函数和流函数	119
6.4.2 圆柱表面的速度分布	120
6.4.3 圆柱表面的压力分布	121
6.5 绕圆柱体的有环量流动 马格努斯效应	122
6.5.1 绕圆柱体有环量流动的速度场	123
6.5.2 绕圆柱体有环量流动的压力分布	124
6.6 附加质量与附加惯性力	126
6.7 复变函数的简要复习	129
6.7.1 复数	129
6.7.2 复变函数	129
6.8 复势和复速度	131
6.9 布拉修斯公式	132

6.10	库塔-儒柯夫斯基定理	133
6.10.1	库塔-儒柯夫斯基定理	133
6.10.2	决定环量的后缘条件	134
6.11	保角变换方法及其应用	135
6.11.1	保角变换的概念和性质	135
6.11.2	几种简单的保角变换	136
6.11.3	儒柯夫斯基变换	138
6.11.4	平板无环量绕流	140
6.11.5	平板有环量绕流	141
6.12	映像法及其应用	143
6.12.1	直壁的干扰	143
6.12.2	圆形壁的干扰	145
本章小结	.....	146
思考题	.....	147
习题	.....	148
第7章	波浪理论	149
7.1	小振幅波的基本方程与边界条件	149
7.1.1	基本方程	150
7.1.2	边界条件	150
7.1.3	小振幅波理论假设和边界条件的线性化	151
7.2	小振幅波及其运动参数	152
7.2.1	小振幅波的速度势	152
7.2.2	小振幅波的运动参数	152
7.3	流体质点的轨道运动	154
7.3.1	水波按水深的分类	154
7.3.2	流体质点的运动速度	154
7.3.3	中等深水波中质点的运动轨道	155
7.3.4	浅水波中质点的运动轨道	156
7.3.5	深水波中质点的运动轨迹	156
7.4	行波中的压力分布	157
7.5	波能及其传递	158
7.5.1	波能	158
7.5.2	波能的传递	159
7.6	浅水波	159
7.6.1	波峰守恒原理	160
7.6.2	浅水波的波数 k 、波长 L 和波速 c	160
7.6.3	浅水系数 H/H_0	160
7.7	波群和群速度	162
7.8	二维船波	165
7.8.1	兴波阻力	165
7.8.2	两个扰源引起的兴波阻力	166
7.9	三维船波——开尔文船波	167
本章小结	.....	168

思考题	169
习题	170
第 8 章 黏性流体力学基础	172
8.1 黏性流体的运动方程式——纳维-斯托克斯方程	172
8.2 纳维-斯托克斯方程准确解举例	176
8.2.1 二维平板间黏性流体的无剪切压差流动	176
8.2.2 无限大平板间压差剪切定常黏性流动	177
8.2.3 无限长直圆管中的定常黏性流动	180
8.3 流体的流态及其判别	182
8.4 湍流流动及其特征	183
8.4.1 湍流的形成机理	184
8.4.2 湍流的特征	185
8.5 湍流模式理论	186
8.5.1 平均值、脉动值和湍流度	186
8.5.2 湍流的半经验理论	187
本章小结	190
思考题	191
习题	192
第 9 章 相似理论	195
9.1 流动相似的概念	195
9.2 特征量和无量纲量	196
9.3 流动相似的充要条件	197
9.4 相似参数的物理意义	198
9.5 相似理论及其应用	199
9.5.1 相似性定理	199
9.5.2 相似理论应用	200
9.6 量纲分析	201
9.6.1 指数法	201
9.6.2 Π 定理	203
本章小结	206
思考题	207
习题	208
第 10 章 黏性流体的一元流动	210
10.1 管道流动计算的基本方程式	210
10.1.1 黏性不可压流体的能量方程式	210
10.1.2 平均能量损失 h_w 的计算	211
10.2 等径直圆管中的层流运动	212
10.3 等径直圆管中的湍流运动	214
10.4 管道中的沿程阻力和局部阻力系数	216
10.4.1 沿程阻力系数	216
10.4.2 局部阻力系数	218
* 10.5 孔口出流	220
10.5.1 孔口出流的分类	220

10.5.2	薄壁小孔口恒定自由出流	220
10.5.3	薄壁小孔口淹没出流	221
10.5.4	薄壁大孔口自由出流	222
10.5.5	薄壁孔口非恒定自由出流	223
* 10.6	管嘴出流	224
10.6.1	圆柱形外管嘴恒定出流	224
10.6.2	其他形式的管嘴	226
10.7	管道计算	227
10.7.1	管道系统的分类	228
10.7.2	简单管道计算	228
10.7.3	串联管道计算	231
10.7.4	并联管道计算	231
本章小结	.....	233
思考题	.....	234
习题	.....	234
第 11 章	边界层理论	237
11.1	边界层的概念	237
11.2	边界层的基本微分方程——普朗特方程	238
11.3	平板层流边界层的精确解	241
11.3.1	布拉修斯解	241
11.3.2	边界层的速度分布和边界层的厚度	244
11.3.3	边界层排挤厚度 δ^* 和动量损失厚度 θ	245
11.3.4	壁面摩擦系数 C_f 和摩擦阻力系数 C_d	246
11.4	平板层流边界层的近似解	247
11.4.1	边界层的动量积分方程	247
11.4.2	平板层流边界层的近似解	247
11.5	平板湍流边界层计算	248
11.6	平板混合边界层计算	250
11.6.1	分段组合计算法	250
11.6.2	当量湍流边界层长度法	252
11.7	船体摩擦阻力的估算	253
11.8	曲面的边界层的分离	254
11.8.1	沿曲面的压力变化及其对边界层内流动的影响	254
11.8.2	边界层内速度剖面形状分析	254
11.8.3	边界层的分离	254
11.9	物体的形状阻力	257
11.9.1	钝体的压差阻力	257
11.9.2	无边界层分离的流线体的压差阻力	258
11.10	减小黏性阻力的措施	259
本章小结	.....	263
思考题	.....	265
习题	.....	265
第 12 章	机翼理论	267

12.1 机翼的几何特征	267
12.1.1 机翼的翼型	267
12.1.2 机翼的平面图形	268
12.2 机翼升力产生的机理	269
12.3 求解翼型绕流的奇点法	270
12.3.1 翼剖面奇点法的理论思想	270
12.3.2 对称翼型绕流的数值解	271
12.3.3 薄翼理论	272
12.4 面元法	275
12.4.1 无升力体的面元法	275
12.4.2 升力体的面元法	277
12.5 机翼的流体动力特性	278
12.5.1 升力系数	278
12.5.2 阻力系数	279
12.5.3 俯仰力矩系数	280
12.6 有限翼展机翼	281
12.6.1 有限翼展机翼的流体运动特征	281
12.6.2 下洗力和诱导阻力	281
12.6.3 有限翼展机翼的升力线理论	282
12.6.4 展弦比换算式	286
12.7 小展弦比机翼	288
本章小结	289
思考题	291
习题	291
附录	293
附录 A 矢量运算公式	293
附录 B 场论公式	293
附录 C 流体力学常用矢量公式	294
参考文献	296

第 1 章 绪 论

1.1 流体力学的研究对象及应用领域

流体是液体和气体的统称。流体最基本的特征是具有流动性。**流体的流动性**是指流体在一个微小的剪切力作用下就能够连续不断地发生变形,即发生流动,只有当剪切力为零时变形才能停止。固体则不同,能维持它固有的形状,它可以承受一定的拉力、压力和剪切力。液体由于具有流动性,因此没有一定的形状,但有一定的体积,它随容器的形状而改变。液体具有自由表面,由于分子间距较大,内聚力较小,几乎不能承受拉力,静止时不能承受剪切力。气体也不能承受拉力,静止时也不能承受剪切力,它具有明显的压缩性,因此它不具有有一定的体积,可以充满整个容器。**流体力学**研究流体的宏观运动规律,以及流体和与之接触的物体之间的相互作用问题。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科。在船舶与海洋工程领域中,船舶与下水运载器的外形设计、稳性、操纵性、快速性、耐波性,海洋结构物的设计,海浪与海流的描述以及海洋能的开发和利用等基本问题都向流体力学提出了广泛的研究课题。在海岸与港口航道工程中,避风港湾、护岸堤坝以及内河航道的设计等都需要流体力学知识。在土木工程中,城市生活和工业用水需要解决一系列水力学问题。在建筑规划与设计,需要研究水文问题。在公路与桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,以及桥梁、涵洞的修建都与水力学密切相关。采暖通风工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输送,都以流体为工作介质。此外,在水利工程、化工流程、石油与天然气输送、环境工程、交通运输等领域中也都遇到不少流体力学问题。可见流体力学在生产和生活中占有重要的地位。只有掌握好流体的各种力学性质和运动规律,才能有效、正确地解决工程实际中所遇到的各种流体力学问题。就船舶与海洋工程领域而言,流体力学作为一门专业基础科学,在推动造船工程技术的发展,开发研制低消耗、高效能舰船的过程中起着非常重要的作用。

流体力学是人类在长期生产实践中,通过科学实验逐步发展起来的。早在几千年以前,随着农业、航运事业的发展,人们就已逐渐认识了一些水流运动规律。我国古代劳动人民早在春秋战国时期和秦朝就已修建了都江堰、郑国渠和灵渠。以后则有汉渠和唐徕渠,大大发展了灌溉事业。与我国相类似,早在几千年前,在古埃及、古巴比伦、古希腊和古印度等地,为了发展农业和航运事业,也修建了大量的渠系。但是,最早真正对流体物理学学科形成做出贡献的是古希腊的阿基米德(Archimedes),他在公元前3世纪撰写了《论浮体》,奠定了流体静力学的基础。

15世纪至17世纪,达·芬奇、伽利略、E.托里拆利、B.帕斯卡、I.牛顿等人用实验方法研究了水的静压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水的切应力等问题。18世纪以后,流体力学得到了较快的发展,对流体运动规律的研究大致可分为两大类:一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导,建立流体运动的基本方程,包括伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等。但是因为这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符,或因数学上难以求解,所以无法用于解决工程实际中的一些复杂问题。另一类研究是为了解决生产实际问题,从大量的实验和实际观测中总结出一些经验关系式,并根据简化后

的一维方程进行数学分析,建立各运动要素间的定量关系。使上述两类研究得到统一的是由德国人 L. 普朗特在 1904 年创立的边界层理论。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算实际物体运动时的摩擦阻力。

20 世纪以来,随着生产和科学技术的发展,特别是航空技术的迅速发展,使理论分析和实验方法日益结合,形成了现代流体力学。根据不同侧重,将侧重于理论分析的流体力学称为**理论流体力学**,将侧重于应用研究的流体力学称为**工程流体力学**。

对于船舶工程而言,船舶航行时和周围流体(包括空气和水)发生了相对运动,因此流体力学和船舶工程有着密切的关系:首先遇到的是“浮性”问题。把几克重的铁扔入水中它就会下沉,而像船这样一个钢铁制造的庞然大物居然能够浮于水面,这是因为浮力定律。这一点在今天看起来十分简单,但在古时候,人们不敢用比水重度大的材料来造船,其原因就是当时并没有真正懂得浮力原理。其次,船舶设计师在进行船舶稳性计算时,要搞清楚风压的大小及风压中心的位置,这也是流体力学的问题。

还有阻力问题。船舶航行时要受到水的阻力,为了较好地理解阻力产生的原因以及进行计算,都必须研究水与船的相互作用。按照目前划分,船受到的阻力有摩擦阻力、形状阻力及兴波阻力等。对这些阻力的深入研究表明它与流体力学的一些领域,如边界层理论和波浪理论有密切关系。

为了克服阻力使船舶获得前进的速度,必须装推进器,因此要研究推进器产生推力的原理并计算推力。螺旋桨叶片剖面具有机翼的形状,因此应用流体力学中机翼理论来研究推进理论时,取得了很大的成功。

此外,舵的剖面形状为对称翼型,因此舵的设计特别是高性能舵的研究与流体力学机翼理论密切相关。

以上只谈了一般性的问题,其他如船舶摇摆和船舶操纵等问题的深入研究,更富有流体力学的特色,由此发展了“船舶流体力学”这门学科。

新型特种船舶的研制,如水翼船、气垫船等,以及当今世界关注的高速大吨位船舶的开发,又给流体力学提出了许多新的研究课题。

1.2 流体力学的研究方法

流体力学发展至今,不断派生出新的分支,但从研究手段上可划分为三种:实验模拟方法、理论分析方法和数值计算方法。

1.2.1 实验模拟方法

在流体力学的发展过程中,实验方法是最先使用的一种,它在其他两种方法出现以前已做出了巨大贡献。实验研究方法在流体力学中有着广泛的应用,流体力学的实验研究主要是在风洞、激波管、水洞、水槽、水池、水电比拟等实验设备中进行模型试验或实物试验。它能在与所研究的问题完全相同或大体相同的条件下进行观测。因此通过实验得出的结果一般来说是可靠的。实验方法的优点是:能直接解决生产中的复杂问题,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正确与否的依据。但是实验方法往往要受模型尺寸的限制,此外还有边界影响、相似准则不能全部满足等问题。还有,针对不同情况,需做不同的实验,即所得结果的普适性较差,费用也较高。

1.2.2 理论分析方法

理论分析是继实验方法之后出现的方法,即建立理论模型的方法。理论分析方法的

特点在于科学地抽象（近似），从而能够利用数学方法求出理论结果，清晰地、普遍地、揭示出物质运动的内在规律。分析方法的优点是：解析解明确地给出了各种物理与流动参数之间的变化关系，有较好的普适性。缺点是数学上的困难很大，能获得的解析解的数量有限。

1.2.3 数值计算方法

用电子计算机进行数值计算，这是20世纪中叶才出现的一种方法。数值方法的优点是：许多用分析法无法求解的问题，用此法可以求得它们的数值解。与实验相比，所需的费用和时间都比较少，而且有较高的精度。当然数值方法也有其局限性，它仍是一种近似方法，它的结果仍应与实验或其他精确结果进行比较。这种方法的缺点是：对于复杂而又缺乏完善数学模型的问题，仍无能为力。正是在这些方面，实验方法和理论分析起到数值方法所不能起的作用。

综上所述，这三大分支构成了流体力学的完整体系，它们各有所长，相辅相成，推动着这一学科不断发展。若要有效地利用流体力学解决工程问题，应当熟练地掌握这些方法以便根据具体情况，取长补短地加以运用。

理论、计算和实验这三种方法各有利弊，相互促进。实验用来检验理论结果和计算结果的正确性与可靠性，并提供建立运动规律及理论模型的依据。这样的作用不管理论和计算发展得多么完善都是不可替代的。而理论则能指导实验和计算，使它更富有成效，并且可以把部分实验结果推广到一整类没有做过实验的现象中去。计算可以弥补理论和实验的不足，对一系列复杂流动进行既快又省的研究。理论、计算和实验这样不断的相互作用是流体力学方法的魅力所在，也是流体力学得到飞速发展的原因之一。

流体力学内容广泛，本书将着重讨论不可压流体（水）对物体（船舶、海洋结构物）的作用力，以及由此而引起的物体的运动。

1.3 流体的连续介质模型

1.3.1 流体的概念

从力学观点看，流体和固体的差别主要在于它们对剪应力的承受能力不同。固体能够产生一定的变形来承受剪应力，流体则不能。无论剪应力多小，流体都将连续地变形——流动，直到剪应力变为零为止。这时流体只承受压力而处于平衡状态。

液体和气体之间也有差别，从力学观点看，差别仅在于它们的可压缩程度不同。液体在常温常压下有确定的体积，很难压缩，因此，当空间容积比液体体积大时，它会出现自由表面。气体容易压缩，又能够均匀地充满整个给定的有限空间，因而它不会出现自由表面。当压缩性和自由表面的影响可以忽略不计时，液体和气体的流动规律就完全一样了。

1.3.2 连续介质模型

流体是由流体分子组成的，流体分子无时无刻不在进行随机的布朗运动。从微观角度看，流体分子之间是不连续的、有间隙的。流体分子之间存在着比分子尺度大得多的间隙。因此，流场中各空间点上的流体物理量本质上是不连续的。

流体不连续将会给数学处理带来很大的麻烦。其实，并不需要关心单个流体分子从哪里来、要到哪里去，也不可能去研究单个流体分子的热运动，人们感兴趣的是许许多多大量流体分子运动的宏观统计特性。流体力学本质上是一门宏观力学。为了避免由于流体分子之间

本质上的不连续所带来的数学处理上的困难，1753 年欧拉提出了连续介质模型。

连续介质的概念源于数学。从数学上讲，实数系是一个连续集。在任意两个不同的实数之间必定存在另一个不同的实数，因而，在任何两个不同的实数之间就有无穷多个实数。时间可以用一个实数系 t 代表，三维空间可以用三个实数系 x 、 y 、 z 来代表，于是可以将时间和空间看成一个四维的连续集。将连续集的概念推广到物质时，认为物质在空间是连续分布的，这种物质就是连续介质。

流体的连续介质模型是基于这样的事实提出的：在非常小的流体体积（质点）内，含有大量的流体分子。现代物理学研究表明，在标准状态下， 1cm^3 水中约有 3.3×10^{22} 个水分子， 1cm^3 气体约有 2.7×10^{19} 个分子。流体的分子平均自由程很小，远小于人们所讨论问题的特征尺寸，并且人们感兴趣的是流体的宏观特性，即大量分子的统计平均特性。这样，有理由不以流体分子作为研究对象，而是引入流体的连续介质模型。

流体的连续介质模型：假定流体是由连续分布的流体质点所组成，即认为流体所占据的空间完全由没有任何空隙的流体质点所充满，流体质点在时间过程中作连续运动。这里所说的**流体质点**，是指流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体，具有以下特点：宏观尺寸非常小，无尺度，可视为一个点；微观尺寸足够大，内含足够多的流体分子；具有质量、密度、压强、流速、动能等宏观物理量，这些物理量是流体质点中大量流体分子的统计平均值；流体质点的形状可任意划定，因而质点与质点之间可以完全没有空隙。

在假设流体为连续介质的条件下，流体的密度可以定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

用类似的方法还可以定义动量密度、能量密度等。因此也可以说，如果某种物质的质量、动量、能量密度在上述数学意义上存在，则这种物质就是连续介质。

流体的连续介质模型有如下特性：

① 流体可以无限分割为任意小的流体质点。质点的质量分布是均匀的，其流体状态服从热力学关系。

② 除特殊情况外，流体的力学和热力学参数在时空中是连续分布的，而且通常认为是无限可微的。

因此，可以应用连续函数的数学方法对流体的运动及动力学问题进行分析。

以上对流体所作的连续介质假设，在通常遇见的工程问题中是合理的。从直观上也可以感觉到，河水和风的流动都是连续的。

由于流体质点在很小的体积内包含有足够多的流体分子，因此能够反映流体的宏观统计特性。但特殊情况下，如高空大气层外的航天器运动时，由于空气稀薄，不能满足在一个流体质点内含有足够多的流体分子的条件，因此连续介质的假设就不再适用。另外，在高速掺气水流（两相流）中、水下爆炸时产生的冲击波波面上连续介质假设也不成立。在微观流体力学中，连续介质假设也不成立。

1.4 流体的密度和重度

单位体积流体的质量称为流体的**密度**，以 ρ 表示，其单位为 kg/m^3 。密度是流体的一个基本物理量。若一团流体的体积为 ΔV ，质量为 Δm ，则比值

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