

高等学校教材

流体力学

LIUTI LIXUE

张国强 吴家鸣 编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等学校教材

流 体 力 学

张国强 吴家鸣 编
罗惕乾 主审



机械工业出版社

本书是根据近年来动力机械、制冷空调和热能工程专业本科生的流体力学课程内容编写的。全书分为基本知识和理论(第1~4章)、工程方法和应用(第5~9章)和计算流体力学(第10~12章)三大部分;力图简明地阐述流体力学的基本理论,注重流体力学在专业领域中的应用,同时对近几十年来一直处于迅速发展的计算流体力学作必要的介绍。本书为能源动力类及机械类专业本科生教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张国强,吴家鸣编.—北京:机械工业出版社,
2005.10
高等学校教材
ISBN 7-111-17738-X

I. 流... II. ①张...②吴... III. 流体力学—高等学校—教材 IV. 035

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第126118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:王霄飞 责任编辑:蔡开颖 版式设计:冉晓华
责任校对:陈延翔 封面设计:张静 责任印制:石冉
三河市宏达印刷有限公司印刷

2006年1月第1版第1次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·20.75印张·513千字
定价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

流体力学是理论性和实用性都很强的一门学科，在机械、环境、化学、土木、水利、船舶、海洋等工程领域有着广泛的应用，是这些相应工程专业大学本科学生必修的技术基础课程之一。

本书是编者根据近年来向动力机械、制冷空调和热能工程专业本科学生讲授流体力学课程的内容为基础编写而成的。全书分为基本知识和理论（第1~4章）、工程方法和应用（第5~9章）和计算流体力学（第10~12章）三大部分，力图简明地阐述流体力学的基本理论，注重流体力学在专业领域中的应用；同时对近几十年来一直处于迅速发展的计算流体力学作必要的介绍；对目前发展较为缓慢、应用较为局限的位势流动，如平面势流，则只略作介绍。

流体力学是以流体为对象宏观地研究流体的运动和作用力之间关系和规律的力学学科分支。流体包括液体和气体，其最显著的特点是易于流动。实际流体都具有粘性，表现为流体在流动过程中会在其内部及接触界面产生摩擦阻力。在流体力学中，通常将流体区分为实际流体（又称粘性流体）和被忽略了粘性的理想流体（又称无粘流体），前者又进一步区分为牛顿流体和非牛顿流体，理想流体和牛顿流体是流体力学的研究对象，而非牛顿流体则是流变力学的研究对象。

流体无一定形状，极易变形，流动时不同流体部分除像刚体一样作平移和旋转运动外，一般还伴随有变形运动，运动的方式远较固体的复杂和多变，仅仅采用质点系方法即拉格朗日法难以满足描述流体复杂运动的要求。为此，流体力学引入了连续介质的概念，以便更好地将数学分析的方法应用于流体运动的研究。另一方面，流体运动的形式虽然多种多样，但实验表明流体流动只呈现两种最基本的形态：层流和湍流。就工程应用而言，则仅有物体内部的流动和物体外部的流动，即内流和外流之分。

地球上的流体不管是静止还是运动，也不管运动时是层流还是湍流，都受到力的作用。在流体力学中，将流体受到的作用力分为体积力和表面力，物体对流体或流体对物体的作用力总是在接触面以压强和摩擦应力的形式传递。在通常情况下，流体受到的体积力仅为重力；对于气体，体积力在多数情况下可忽略不计。

流体力学的科学基础是物理学中的三大定律：即物质守恒定律、牛顿第二运动定律（动量定律）和能量守恒定律。将这些定律以适合于流体力学的方式表达，就得到流体运动的控制方程——连续方程、动量方程、动量矩方程和能量方程。由于流体的运动复杂多变，要有效地分析和求解流体流动问题就必然要涉及很多不同于固体力学的概念和方法，包括一些假设和数理方法，如湍流模型和流动相似分析等；当然也沿用固体力学的一些概念，特别是弹性固体与牛顿流体在物理属性和应力方面的类似关系。

在流体力学发展的早期，有理论流体力学和实验流体力学之分。在理论方面，1755年欧拉方程的提出使理论流体力学关于理想流体运动的分析逐渐完善，但理想流动的理论解与实验结果以及真实流动往往不相吻合；1845年纳维-斯托克斯方程的建立则奠定了现代粘性

流体力学的基础。在实验方面,有牛顿对流体粘性的早期认识,有雷诺对层流和湍流的观测,以及近代研究对湍流拟序结构的发现,等等。20 世纪初普朗特提出的边界层理论将理论流体力学和实验流体力学统一了起来,从而使流体力学在工程实际中的应用得到了空前的发展。电子计算机的出现和发展也使理论流体力学和实验流体力学的区分变得更为模糊,并促进了当今非常活跃的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称 CFD)的兴起和发展。计算流体力学已经成为流体力学中发展最快的领域之一,是目前解决粘性流动问题的重要手段并广泛应用于数值模拟各种流动现象——大到气象和自然灾害问题、流体输送管路、动力机械和流体机械的动力设计问题,小到心血管中的血液流动问题,等等。另一方面,由于航空航天的需要而发展起来的空气动力学(Aerodynamics)已使人类飞天的梦想得以实现,飞机和火箭不再被视为奇迹。

随着现代大型电子计算机、激光、超声、电子、图像采集和处理等高新技术的飞速发展和应用,流体力学研究中的实验方法、测试手段、数值计算都更为精细和准确。理论、实验和计算方法前所未有的结合使流体力学不断适应社会发展、解决新的流动问题,成为众多工程学科不可缺少的技术工具。

编者在本书的编写过程中,参考和直接引用了一些流体力学和计算流体力学书籍中的内容(包括图例和习题)以及互联网上的资料,谨向各有关作者致谢!

本书第 1~9 章由张国强博士编写,第 10~12 章由吴家鸣博士编写,全书由罗惕乾教授主审。虽然本书在形成过程中几经琢磨并数易其稿,但受限于编者的学识,疏漏错误之处有所难免,敬请读者谅解和指正。

编 者
于广州

常用符号表

1. 下标 (上标)

0	参照点面, 初始值		方向
1	进口点面	a, r, u	叶轮的轴向、径向和切向
	直角、柱、球坐标系的 x, r, R	e	射流边界, 典型单元 (上标)
	方向	n	法向
2	出口点面	R, φ, θ	球坐标系三参照方向
	直角、柱、球坐标系的 y, θ, φ	r, θ, z	柱坐标系三参照方向
	方向	t	切向, 湍流
3	直角、柱、球坐标系的 z, z, θ	x, y, z	直角坐标系三参照方向

2. 大写英文字母

A	平面, 平面面积	K	湍流动能
	总体有限元方程系数矩阵		单元有限元方程系数矩阵
C	周长, 周界线, (积分) 常数	L	长度, 动量矩
C_D	阻力系数	L^*	伴随算子
C_f	壁面切应力系数	Ma	马赫数
C_L	升力系数	N	湍流度
D	直径, 膨胀项, 扩散系数	P	功率
D_e	当量直径		单元有限元方程右端项矩阵
E	弹性模量, 能量	Pr	普朗特数
Eu	欧拉数	Q	热量
F	力, 总体有限元方程右端项矩阵	R	半径, 曲率半径, 矢径 (黑体), 气体常数
F_D	阻力		雷诺数
F_L	升力	Re	雷诺数
Fr	弗劳德数	S	曲面, 曲面面积, 边界面, 求解边界
G	重力, 切变模量, 放大因子	Sr	斯特劳哈尔数
H	高度, 深度; 形状因子; 泵压头	T	热力学温度, 转矩
I	截面二次矩	V	体积
J	转动惯量, 动量通量	W	功, 速度复势, 空间差分算子

3. 小写英文字母

a	加速度, 卷吸系数, 热扩散率	g	重力加速度
b	射流半厚度	h	高度, 深度, 拉梅系数, 比焓, 空间步长
c	比热容, 绝对流速, 扰动传播速度	h_i	沿程压头损失
c_0	声速	h_i	惯性压头
c_p	比定压热容	h_j	局部压头损失
c_v	比定容热容	h_w	总压头损失
d	直径	i	哑元
e	比能, 单位矢量 (黑体), 偏心距	i, j, k	直角坐标系三正交单位矢量
	离散误差	l	长度, 掺混长度, 翼型弦长
f	单位质量力, 频率, 冲量函数		

n	单位法向矢量	r	半径, 冲量函数
p	压强	s	比熵, 曲线长度
p_a	大气压强	t	时间, 摄氏温度
p_b	背压	u	速度, x 方向分速度, 圆周速度
p_e	设计出口压强	v	比体积, 平均速度, y 方向分速度
p_g	表压强	w	比功, 相对速度, z 方向分速度
p_v	真空度	y_c	形心坐标
q	面积热流量, 流量函数	y_d	压力中心坐标
q_m	质量流量	z	复自变量
q_v	体积流量		
4. 希腊字母			
α	动能修正系数	κ	体积压缩率, 等熵指数
α_v	体膨胀系数	λ	沿程损失系数, 速度系数, 网格比, 热导率
β	动量修正系数	λ_x, λ_y	x 和 y 方向的 Courant 数
Γ	速度环量	μ	动力粘度, 马赫角
γ	方向角, 射流扩散角	μ_t	湍流粘度
$\dot{\gamma}$	切应变率	ξ	局部损失系数, 映射平面横坐标
Δ	粗糙度	π	质量势函数, 压比, 压比函数
	三角形单元面积	ρ	密度, 曲率半径
Δ_e	当量粗糙度	σ	表面张力, 应力张量 (黑体)
δ	边界层厚度, 气流转折角	τ	切应力, 温比函数
δ_1	边界层位移厚度	ν	运动粘度, 泊松比
δ_2	边界层动量厚度	Φ	粘性耗散函数, 基函数矢量
δ_3	边界层能量厚度	ϕ	基函数
ϵ	密度比函数, 湍流耗散率, 允许误差	φ	速度势函数
		ψ	流函数
ζ	映射平面	Ω	涡量; 求解域
η	效率, 流量系数, 映射平面纵坐标	ω	角速度
θ	差分加权因子	∇	哈密顿算子 (那勃勒算子)
K	体积模量	∇^2	拉普拉斯算子

目 录

前言

常用符号表

第1章 流体及其属性 1

1.1 流体 1

1.1.1 连续介质 1

1.1.2 液体和气体 3

1.1.3 层流和湍流 3

1.1.4 流体流动和受力 3

1.2 粘性 4

1.2.1 牛顿切应力公式 4

1.2.2 粘度 5

1.2.3 理想流体、牛顿流体和非牛顿流体 7

1.3 压缩性和膨胀性 8

1.3.1 体积模量和体积压缩率 8

1.3.2 体膨胀系数 9

1.4 其他属性 9

1.4.1 表面张力 9

1.4.2 毛细现象 10

1.4.3 汽化压强 11

习题 12

第2章 流体的平衡 13

2.1 流体静力平衡和静压强 13

2.2 流体静力平衡方程 14

2.2.1 微分方程 14

2.2.2 压差方程 15

2.2.3 帕斯卡原理 15

2.3 重力作用下静止流体的压强分布 16

2.3.1 匀质流体 16

2.3.2 标准大气 17

2.4 流体静压强的计量和测量 18

2.4.1 静压强的计量 18

2.4.2 静压强的测量 19

2.5 静止流体对物面的作用力 20

2.5.1 对平面的作用力 20

2.5.2 对曲面的作用力 22

2.5.3 浮力及浮体的稳定性 24

2.6 非惯性坐标系中流体的平衡 25

2.6.1 等加速直线运动容器中流体的相对平衡 25

2.6.2 等角速旋转容器中流体的相对平衡 27

习题 28

第3章 流体的运动 31

3.1 流体运动描述方法 31

3.1.1 拉格朗日法 31

3.1.2 欧拉法 32

3.1.3 拉格朗日法和欧拉法描述的流体变量间的变换 33

3.1.4 系统和控制体 35

3.2 流体微元运动分析 36

3.2.1 速度分解公式 36

3.2.2 速度分解公式中各项的物理含义 37

3.3 流体运动的边界条件和物理约束 39

3.3.1 边界条件 39

3.3.2 物理约束——连续方程 39

3.4 流体运动若干形式 41

3.4.1 流体运动分类 41

3.4.2 平面势流 43

习题 51

第4章 流体运动基本方程 52

4.1 微分形式的基本方程 52

4.1.1 连续方程 52

4.1.2 欧拉方程 52

4.1.3 纳维-斯托克斯方程 54

4.1.4 能量方程 58

4.1.5 涡量方程 59

4.2 积分形式的基本方程 60

4.2.1 连续方程 60

4.2.2 伯努利方程 61

4.2.3 动量方程	64	6.4 二维圆柱滑动轴承的润滑	107
4.2.4 动量矩方程	66	6.4.1 雷诺润滑方程	108
4.3 微分形式基本方程的一些 理论解	70	6.4.2 二维圆柱滑动轴承的润滑	109
4.3.1 库埃特流动	70	6.5 圆柱和圆球绕流阻力	111
4.3.2 泊肃叶流动	71	6.5.1 圆柱绕流	112
4.3.3 重力作用下的平行流动	71	6.5.2 圆球绕流	113
4.4 微分形式基本方程在圆柱和 球坐标系中的表示	73	习题	114
4.4.1 正交曲线坐标系	73	第7章 实际流体管内流动	116
4.4.2 正交曲线坐标系中散度、梯度、 旋度、调和量和输运量的表示	75	7.1 实际流体管内流动及伯努利 方程	116
4.4.3 微分形式基本方程在圆柱坐标系 和球坐标系中的表示	77	7.1.1 沿程流动损失	116
习题	78	7.1.2 局部流动损失	118
第5章 量纲分析和相似原理	81	7.1.3 总流动损失	119
5.1 量纲分析	81	7.1.4 实际流体管内流动的伯努利 方程	120
5.1.1 单位、量纲、量纲式	81	7.1.5 摩擦阻力	121
5.1.2 物理方程的量纲齐次性	83	7.2 圆管内层流分析	122
5.1.3 量纲分析方法	83	7.3 圆管内湍流分析	123
5.2 相似原理	85	7.3.1 湍流各物理量的表示方法	123
5.2.1 流动相似条件	85	7.3.2 湍流基本方程	125
5.2.2 动力相似特征数	86	7.3.3 圆管内湍流速度分布	126
5.2.3 动力相似特征数的应用	87	7.4 沿程损失系数和局部损失系数 的确定	128
习题	89	7.4.1 沿程损失系数	128
第6章 边界层流动	90	7.4.2 局部损失系数	131
6.1 边界层基本概念	90	7.5 压力管路水力计算	132
6.1.1 边界层流态	91	7.5.1 管路特性曲线	133
6.1.2 边界层厚度	92	7.5.2 长管路	133
6.1.3 边界层位移厚度	92	7.5.3 短管路	137
6.1.4 边界层动量损失厚度	92	7.6 压力管路水击现象	139
6.1.5 边界层能量损失厚度	93	7.6.1 水击产生的机理与过程	140
6.2 二维平面边界层流动	93	7.6.2 水击预防	141
6.2.1 微分方程及其精确解	93	7.6.3 水击压强计算	142
6.2.2 积分方程及其近似解	98	7.7 管内非定常流动	143
6.3 二维曲面边界层流动	102	7.7.1 连续方程和伯努利方程	143
6.3.1 边界层方程	103	7.7.2 变压头泄流	145
6.3.2 边界层分离	104	7.7.3 空蚀	146
6.3.3 层流边界层的卡门-波尔豪森 近似解法	105	习题	147
6.3.4 湍流边界层的海特近似解法	106	第8章 气体一维定常流动	149
		8.1 一维定常流动方程	149
		8.1.1 连续方程	149

8.1.2 动量方程.....	149	10.1.2 流体运动控制方程的通用微分方程 及计算流体力学的模型方程	190
8.1.3 状态方程.....	150	10.1.3 初始条件与边界条件	193
8.1.4 能量方程.....	150	10.1.4 与计算流体力学有关的偏微分 方程分类及其意义	194
8.2 亚、超声速流动的基本性质	152	10.2 计算流体力学的发展及常用数值 方法	196
8.2.1 声速和马赫数.....	152	10.2.1 计算流体力学的发展	196
8.2.2 亚、超声速流场中小扰动的传播 特性.....	154	10.2.2 计算流体力学常用数值方法	197
8.2.3 通流面积对气体流动的影响.....	155	10.2.3 计算流体力学主要商业软件 简介	199
8.3 一维定常等熵流动气体动力学 函数	156	第 11 章 有限差分法	200
8.3.1 滞止参数.....	156	11.1 有限差分法理论基础	200
8.3.2 临界截面.....	157	11.1.1 有限差分法简例	200
8.3.3 气体动力学函数.....	158	11.1.2 差分格式及其基本构造方法	202
8.4 激波和膨胀波	160	11.1.3 差分方程的相容性、收敛性和 稳定性	206
8.4.1 正激波.....	161	11.1.4 Lax 等价定理	211
8.4.2 斜激波.....	163	11.1.5 傅里叶稳定性分析法	211
8.4.3 膨胀波.....	164	11.2 一维扩散方程差分格式	214
8.5 气体在喷管和等截面管内的加速 流动	166	11.2.1 一维扩散方程的定解问题	214
8.5.1 收缩喷管.....	166	11.2.2 显式差分格式及其求解	215
8.5.2 拉伐尔喷管.....	167	11.2.3 隐式差分格式及其求解	216
8.5.3 等截面管.....	168	11.2.4 加权混合格式	219
习题	170	11.2.5 Du Fort-Frankel 格式	221
第 9 章 气体自由射流	172	11.3 一维对流方程差分格式	223
9.1 定常射流	172	11.3.1 双曲型方程的特征线和适定性 提法	223
9.1.1 流动特征.....	173	11.3.2 CFL 条件和迎风格式	224
9.1.2 流动方程.....	174	11.3.3 隐式差分格式	226
9.2 平面射流的动量积分解	175	11.4 一维对流扩散方程差分格式	228
9.3 轴对称射流和平面射流的半经验 公式解	178	11.4.1 显式格式	228
9.3.1 轴对称射流.....	178	11.4.2 隐式格式	230
9.3.2 平面射流.....	183	11.5 二维空间差分格式	232
9.4 温差射流和浓差射流	183	11.5.1 二维抛物型偏微分方程差分 格式	232
9.4.1 温差射流.....	183	11.5.2 二维双曲型偏微分方程差分 格式	234
9.4.2 浓差射流.....	184	11.6 二维不可压粘性流动的有限 差分解法	235
9.4.3 射流弯曲.....	185	11.6.1 流函数-涡量法	235
习题	186	11.6.2 速度-压强法	241
第 10 章 计算流体力学简述	188		
10.1 计算流体力学的模型偏微分 方程及其定解条件	188		
10.1.1 流体运动控制方程	188		

习题	242	12.3 二维不可压无粘流动问题的 有限元计算	280
第 12 章 有限元法	243	12.3.1 问题的提法及解域剖分	281
12.1 有限元法理论基础	243	12.3.2 按加权余量法求解关于圆柱绕流 的流函数定解问题	283
12.1.1 若干数学概念	243	12.3.3 按变分法求解关于圆柱绕流的势 函数定解问题的简要过程	286
12.1.2 加权余量法	248	习题	287
12.1.3 变分原理	255	附录	288
12.1.4 里兹 (Ritz) 法	262	附录 A 气体一维定常等熵流动 函数表	288
12.2 有限元法一般介绍	263	附录 B 人名和术语中英文对照	314
12.2.1 有限元法基本思想	263	参考文献	321
12.2.2 解域剖分	271		
12.2.3 单元分析	273		
12.2.4 总体有限元方程合成与边界条件 处理	277		

第 1 章 流体及其属性

流体包括气体和液体，空气和水是人们最熟悉也是最重要的流体。

流体力学是以流体为对象宏观地研究流体的运动和作用力之间关系和规律的力学学科分支，流体的一些属性，特别是粘性和压缩性，必然要影响流体的流动和作用力。本章从流体力学的角度讨论流体及其属性。

1.1 流体

流体最显著的特性是易于流动，只要受到剪切力作用，就会连续不断地变形，直到剪切力消失变形才停止。根据这种属性可定义流体为：在任何微小切应力作用下都会发生连续变形的物质。

由于流体无一定形状、极易变形，致使流体的运动形式复杂多变。为了更有效地应用数学分析的方法研究流体运动，流体力学中引入了连续介质的概念。另一方面，流体运动的形式虽然多种多样，但实验表明流体的流动只呈现两种最基本的形态：层流和湍流。

流体不管是处于静止还是运动状态，也不管流体在运动时是层流还是湍流，都要受到力的作用并对与其接触的物体产生作用力。

1.1.1 连续介质

连续介质是由内部没有间隙且连续排列的质点所组成的物质，是为了便于理论分析提出的而又接近实际的假想模型。流体质点也称为流体微团，是宏观意义上的微尺度。

欧拉首先将连续介质模型应用于流体，将流体看成由无限多的彼此间连续排列且内部没有间隙的流体质点所组成，进而有效地应用数学的方法对流体运动进行分析，推动了理论流体力学的发展。

流体由大量作不停息运动的分子所组成，分子间存在空隙，流体的一切宏观参数，包括温度、压强等，都是大量分子行为的统计平均值。虽然在微观上流体内部有空隙并且不连续，但在通常情况下即便在极其微小的流体体积内也存在大量的分子。例如，在标准状况下 $1\mu\text{m}^3$ 的理想气体就含有 2.69×10^7 个分子（ 1mol 理想气体含有 6.02×10^{23} 个分子，占有体积 22.4L ）；同样体积的液体所含的分子数则更多。在绝大多数涉及流体运动的实际问题中， $1\mu\text{m}^3$ 这样一个尺度可以看做是几何上的一个点，流体的流动发生在远大于此尺度的空间。由此：

1) 客观存在宏观上足够小（远小于宏观流动的几何尺度）、微观上足够大（仍包含大量分子，使分子行为的统计平均值能代表和反映流体的宏观物理性质）的小体积，它们可以看成是几何上的点，包含在这样的小体积中的流体组成一个个的流体质点。流体可以看成是由这样的连续排列且其间没有空隙的流体质点所组成。

2) 流体在空间某点的物理和流动参数，在任何瞬间，取决于在此瞬间占据该空间点的

流体质点的宏观参数。

3) 除在个别的点、线、面外, 流体的一切宏观参数都是空间坐标和时间序列的连续函数, 例如, 可在直角坐标系将流速表示为 $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$, 进而用数学分析的方法来研究流体的宏观运动。

以上几点是连续介质模型在流体力学中的具体表述。对于特定的流体流动, 连续介质模型适用与否可用克努森数 Kn 来判断。定义

$$Kn = \frac{\lambda}{l}$$

式中, Kn 是克努森数; λ 是分子平均自由程, 单位为 m ; l 是流体流动空间的特征长度, 单位为 m 。

对于绕过球体的流体运动或圆管内的流体流动, 一般取直径为特征长度。

实践表明, 对于所有的液体流动和通常条件下的气体流动, $Kn \ll 1$, 连续介质模型适用。因此, 连续介质流体的压强、密度和比体积这些宏观物理参数可定义如下。

1. 压强

为流体单位面积上所受作用力的法向分量, 有

$$p = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A}$$

式中, p 是压强, 单位为 Pa ; δA 是微元面积, 单位为 m^2 ; δF 是 δA 面积上所受作用力的法向分量, 单位为 N , 方向为指向作用面。

流体中某处的压强可表示为: $p = p(x, y, z, t)$ 。习惯上压强又称为压力, 空气在平均海平面处的压强为 $101325 Pa$ 。

2. 密度

为单位体积流体的质量, 有

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V}$$

式中, ρ 是密度, 单位为 kg/m^3 ; δV 是微元体积, 单位为 m^3 ; δm 是 δV 体积内流体的质量, 单位为 kg 。

流体中某处的密度可表示为: $\rho = \rho(x, y, z, t)$ 。在 $4^\circ C$ 、一个标准大气压下, 纯净水的密度为 $1000 kg/m^3$ 。

3. 比体积

为单位质量流体所占据的空间体积:

$$v = \lim_{\delta m \rightarrow 0} \frac{\delta V}{\delta m}$$

式中, v 是比体积, 单位为 m^3/kg 。

流体中某处的比体积可表示为: $v = v(x, y, z, t)$ 。根据密度和比体积的定义, 有 $\rho v = 1$ 。

处于化学平衡状态的流体, 可用温度、压强和密度 (或比体积) 来描述其状态, 并且只需其中的任何两个参数就可以完全确定流体的状态。描述温度、压强和密度三者间关系的式子称为状态方程, 例如著名的理想气体状态方程。

1.1.2 液体和气体

从流体力学的角度看,液体和气体的差异主要表现在两个方面——自由表面和压缩性。液体在重力作用下可以不占满整个容器的空间而存在自由表面,即液-汽或液-气分界面,因此,容易产生表面波,例如水波。液体在通常条件下难以被压缩,气体则容易被压缩,并且总是充满整个容器的空间;流动的气体如果被挤压得过于激烈就有可能产生冲击波,例如,飞机作超声速飞行时在空气中产生的激波。此外,液体和气体剧烈膨胀时的表现也不相同,液体可能汽化,而流动气体则可能达到声速甚至超声速。

液体和气体的以上这些差异是由其内部微观结构、分子热运动和分子间作用力所决定的。一般地,相同体积内的分子数量气体的最少,固体的最多,液体的居于两者之间。分子热运动的情况非常复杂,主要取决于物质的内部微观结构及单位体积中分子数量,其宏观反映为热力学温度。固体的分子间相互作用力较大且表现为引力,而流体的分子间相互作用力则很微弱。因此,在宏观上就有:固体具一定体积和形状,气体无一定体积和形状(即取容器的体积和形状),而液体则介于两者之间——具一定体积但无一定形状。

地球上的气体和液体在其占据空间方面的差异主要因重力引起,在无地球引力的太空,液体也和气体一样无法保持体积而向四面八方飘荡,表明它们的分子间相互作用力非常小,往往可以忽略。

1.1.3 层流和湍流

根据流体微团运动形态的不同可以将流体的运动分为层流和湍流(又称紊流)。层流变化为湍流的过程称为转捩,是一个由有序变为混沌无序的过程。

层流时,流体微团在各自的轨道上运动,彼此不发生干扰或碰撞,因此,流动平稳有序。流体运动速度很低时往往保持层流形态,如图1-1中翼型下方的流动。

湍流时,流体微团之间不断地碰撞与掺混,导致流动紊乱,流速和压强等参数随时间无序地脉动,如图1-1中翼型上方靠近尾部的流动。自然界以及工程实际中的流体流动多数为湍流。

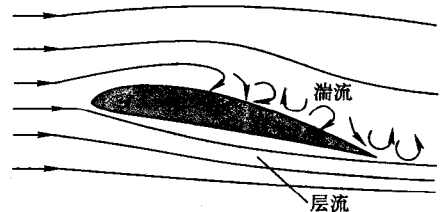


图 1-1 翼型周围的层流和湍流

1.1.4 流体流动和受力

运动中的流体,不管是层流还是湍流,必然要受到力的作用。地球上的流体受到的力可分为表面力和质量力两大类,它们分别又称为接触力和体积力。

1. 表面力

其大小正比于作用面积,包括:

- (1) 粘性力 阻碍流体运动的力,仅在流体微团作相对运动时产生。
- (2) 非粘性压力 流体内部斥力,由分子运动和分子间作用力引起。
- (3) 湍流力 流体微团在运动中进行动量交换而引起的作用力。
- (4) 表面张力 不相混合的流体因各自分子引力不同而在分界面产生的作用力。

(5) 附着力 流体和固体因各自分子引力不同而在接触面产生的作用力。

2. 质量力

其大小正比于流体的质量。地球上流体受到的质量力包括：

(1) 重力 源于地球引力产生的重力加速度，其大小为： $F_g = -mg$ 。

(2) 牵连惯性力 源于非惯性坐标系的线性加速度，其大小为： $F_i = -ma_i$ 。

(3) 科氏惯性力 源于非惯性坐标系的科氏加速度，其大小为： $F_k = -ma_k$ 。

地球上的流体还可能受到电磁力的作用，但其数值通常很小，一般可忽略不计。

1.2 粘性

粘性是流体最重要的属性之一，表现为流体在运动过程中会在其内部及接触界面产生摩擦阻力。

流体在切力作用下将连续不断地产生变形，但在相同大小的切力作用下，不同的流体会产生不同程度的变形，流体这种抵抗剪切变形的属性就称为粘性，抵抗变形所产生的力称为粘性力，单位面积上的粘性力称为粘性应力。

由于粘性，作相对运动的流体各部分之间存在摩擦力，这种摩擦力发生在流体内部，故又称为内摩擦力或粘性摩擦力。阻碍流体作相对运动的内摩擦力来源于：

(1) 分子间的作用力 在分子间相距很小时表现为斥力，相距稍大时表现为引力，引力随分子间距离的增大而迅速减小，流体分子间的作用力为引力，但很微弱。

(2) 分子动量交换 相邻部分的流体作相对运动时，由于分子的无规则运动而不断地交换分子，同时交换分子所携带的动能和动量，这种交换会使速度较大的流体分子失去部分动能而减速，速度较小的流体分子得到动能而加速。

(3) 流体微团动量交换 相邻部分的流体作相对运动时，由于流体微团的紊乱运动而不断地彼此碰撞和交换位置，同时交换它们所携带的动能和动量，这种交换会使速度较大的流体微团失去部分动能而减速，速度较小的流体微团得到动能而加速。

根据以上内摩擦力产生的不同机理，将粘性分为层流粘性（或分子粘性）和湍流粘性。它们分别是相邻流体分子间和相邻流体微团间相互作用的结果。

1.2.1 牛顿切应力公式

如图 1-2 所示，水平设置的两块二维平板，下平板固定不动，上平板可以水平移动，二板间间距 δ 很小且充满流体。当上平板以速度 U 作水平方向运动时，带动板间流体运动。由无滑动条件（即与固体表面直接接触的流体与固体表面之间无相对运动），可知紧贴下板的一层流体静止不动，紧贴板上板的一层流体跟随上板一起运动；由小的板间距可认为，板间流体速度呈线性分布，即 $u = ky$ ，其中 u 为流速、 y 为与流速垂直的坐标、 k 为比例常数。

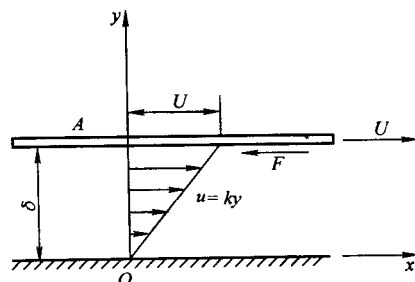


图 1-2 流体在平行平板间隙中的直线流动

流体各层的速度不同引起流体变形，产生内摩擦力，并在上平板接触面产生阻碍运动的

粘性切力 F 。实验表明, F 与上平板的运动速度 U 和面积 A 以及板间距 δ 有以下关系, 即

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{U}{\delta}$$

式中, μ 是动力粘度, 单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; τ 是切应力, 单位为 Pa ; U/δ 是沿垂直于速度方向单位长度上的速度变化量, 即速度梯度。

由于板间流速呈线性分布, 所以流体中各处的切应力都相等。对于如图 1-3 所示的更为一般的流体流动, 上式应写成以下更为通用的形式, 即

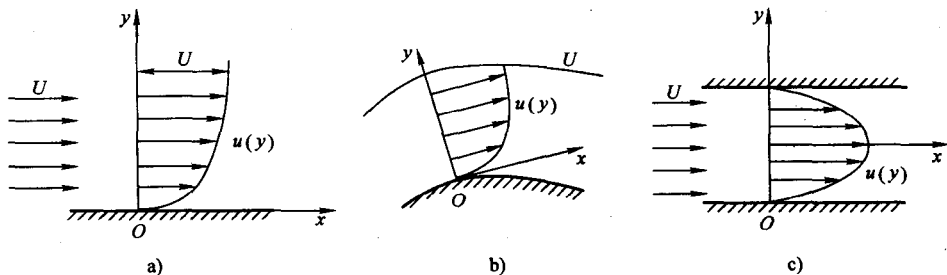


图 1-3 几种常见的二维流动

a) 平面绕流 b) 曲面绕流 c) 管内流动

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 由牛顿首先提出, 故称为牛顿切应力公式或牛顿内摩擦定律, 它揭示了流体在作层流运动时, 流体中某点切应力的大小与该点的速度梯度之间成正比的关系。

速度梯度与流体微元变形之间有着密切的关系, 流体微元是为便于进行数学分析而从流体中取出的体积微元, 其下极限是流体微团或质点。如图 1-4 中的二维图形所示, 在 t 时刻为长方形的流体微元, 在 $t + dt$ 时刻变为平行四边形。该长方形的切应变和切应变率分别为 $(du/dy)dt$ 和 du/dy , 它们分别又是该长方形的角变形 $d\gamma$ 和角变形率 $d\gamma/dt$ 。因此又可以说, 流体作层流运动时受到或产生的切应力正比于切应变率或角变形率。

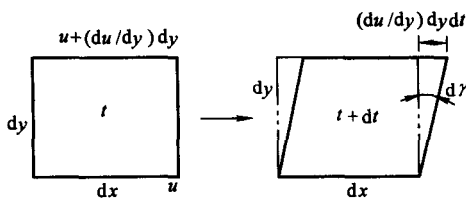


图 1-4 速度梯度与角变形率的关系

1.2.2 粘度

粘度和粘性在一些情况下是可以互换的两个概念, 前者反映量值, 后者反映属性。流体粘度越大就越难以流动, 粘度越小则越易于流动。

1. 动力粘度

将牛顿切应力公式 (1-1) 变换为 $\mu = \tau / (du/dy)$, 就得到粘度 μ 的定义式。 μ 的单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$, 因为该单位中包含力的单位, 所以称为动力粘度。

2. 运动粘度

流体力学分析中常出现动力粘度与密度之比值 μ/ρ , 该比值包含运动学的单位, 故称为运动粘度, 单位为 m^2/s , 用符号 ν 代表, 即 $\nu = \mu/\rho$ 。

3. 恩氏粘度

用符号 E 表示, 其定义为: 在某一恒定温度下 200cm^3 的液体流出恩氏粘度计所需要的时间 t 与 20°C 下同体积的纯净水流出同一粘度计所需的时间 t_0 (51s) 之比, 即 $E = t/t_0$, 单位用 $^\circ\text{E}_t$ 表示。

除以上的粘度表示方法外, 在美国还用国际赛氏秒和赛氏弗氏秒表示。动力粘度, 运动粘度, 恩氏粘度, 国际赛氏秒和赛氏弗氏秒度量单位之间的换算关系见表 1-1。

表 1-1 粘度表示方法及度量单位换算关系

名称	又名	英文名称	符号	单位	与运动粘度的换算关系
动力粘度	粘度	dynamic viscosity	μ	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu = \mu/\rho$
运动粘度	动粘度	kinematic viscosity	ν	m^2/s	
恩氏粘度	条件粘度	Engler degrees	E	$^\circ\text{E}_t$	$\nu = 7.31E - 6.31/E$
国际赛氏秒	通用赛波特秒	seconds Saybolt universal	SSU	s	$\nu = 0.22\text{SSU} - 180/\text{SSU}$
赛氏弗氏秒	赛波特-弗鲁尔秒	Saybolt-Furol seconds	SFS	s	$\nu = 2.2\text{SFS} - 203/\text{SFS}$

4. 温度和压强对粘度的影响

粘性是分子引力和分子动量交换在流体作宏观运动时体现出来的物理属性。对于气体, 粘度的大小主要取决于分子动量交换的强烈程度, 温度上升时分子动量交换加剧, 所以气体的粘度一般随温度上升而增大; 对于液体, 粘度主要取决于分子间引力的大小, 温度上升时分子间的距离增大、引力减小, 所以液体的粘度一般随温度上升而减小。

流体的粘度一般随压强的增大而增大, 但只有在大的压强变化下这种影响才比较明显, 在常压下可不考虑压强对流体粘度的影响。表 1-2 和表 1-3 分别列出了空气和水在一些温度下的粘度值。

表 1-2 空气在一些温度下的粘度值 ($p = 101325\text{Pa}$)

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$
0	17.09	13.20	180	25.05	32.20	360	31.46	56.50
20	18.08	15.00	200	25.82	34.60	380	32.12	59.50
40	19.04	16.90	220	26.58	37.10	400	32.77	62.50
60	19.97	18.80	240	27.33	39.70	420	33.40	65.60
80	20.88	20.90	260	28.08	42.40	440	34.02	68.80
100	21.75	23.00	280	28.77	45.10	460	34.63	72.00
120	22.60	25.20	300	28.46	48.10	480	35.23	75.20
140	23.44	27.40	320	30.41	50.70	500	35.83	78.50
160	24.25	29.80	340	30.80	53.50			

【例 1-1】 如图 1-5 所示, 利用液体摩擦传递转矩 T 的摩擦盘直径为 d , 间隙为 δ , 盘间液体的粘度为 μ , 主、从动轴的旋转角速度分别为 ω_1 、 ω_2 。求以 T 、 d 、 δ 、 μ 表示的滑移角速度 $(\omega_1 - \omega_2)$ 的公式。

解 根据牛顿切应力公式有

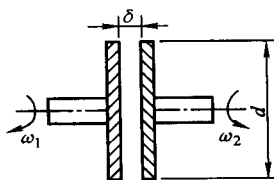


图 1-5 例 1-1 图