

高等学校教材

流体力学和 热工理论基础

(修订本)

上海机械学院 钟声玉
哈尔滨工业大学 王克光 主编

728344

机械工业出版社

高等学校教材

流体力学和热工理论基础

(修订本)

上海机械学院 钟声玉 主编
哈尔滨工业大学 王克光

HK37106



机械工业出版社

前 言

本书自1980年出版以来,已经重印七次。由于我国社会主义四化建设不断提出新的要求和学科内容不断更新,以及使用本教材的教学经验不断积累,1984年在哈尔滨制定了高等工业院校工业自动化仪表专业《流体力学和热工理论基础》教学大纲,本书据此作了一次较大的修订。

修订本除保持原书力求贯彻理论联系实际和符合学生认识规律等原则外,还着重加强理论基础,扩大知识面,适当反映学科的新发展,以使学生学习后能获得必要的较为宽广的流体力学和热工学的基础知识。修订本的主要变动如下:

流体力学理论基础方面,对原书中的“平面无涡运动与涡旋运动”、“附面层理论基础”和“两相流动”等章节的内容作了较大的修改;增加了“量纲分析和相似原理”、“缝隙流动”和“气体管内流动”等章节;删去了“磁流体力学”的内容。

热工理论基础方面,对“气体热力性质”、“热力学第二定律”和“导热”、“对流换热”、“辐射换热及换热器设计计算”等章节作了较大的修改;增加了“热力平衡条件”、“湿空气”及“导热机理”、“有内热源的导热”、“对流、沸腾与凝结的工程应用”及“测温误差分析”等章节;删去了“气体流动”的内容。

本书为高等学校工业自动化仪表专业教材,也可供其它机械类专业以及有关工程技术人员参考。

本书流体力学理论基础部分由上海机械学院钟声玉同志主编,赵学端同志主审。钟声玉编写第一章至第六章,应启夏编写第七章至第十一章(其中第七章、第九章和第十一章是在第一版沈承龙同志编写的基础上改写的),沈昱明编写了习题。热工理论基础部分由哈尔滨工业大学王克光同志主编,上海机械学院徐昂千同志主审。王克光编写传热学部分,张管生编写工程热力学部分。

修订稿审稿会议于1986年7月在哈尔滨召开,参加审稿的有原国家机械委教材编辑室、同济大学、南京工学院、西安交通大学、天津大学、哈尔滨建筑工程学院、上海机械学院和哈尔滨工业大学等有关同志。与会同志提供了许多宝贵的意见和建议,在此谨表示衷心的感谢!

由于我们的学科知识和专业知识都有限,书中定有缺点和错误,恳切希望使用本书的读者指正。

编者

1988年7月

流体力学理论基础的主要符号表

符号	名 称	单 位	符号	名 称	单 位
A	面积	m^2	q_m	质量流量	kg/s
a	加速度	m/s^2	q_v	体积流量	m^3/s
C_f	壁面摩擦阻力系数		R	水力半径	m
C_R	绕流阻力系数		r	半径、曲率半径	m
c	声速; 比热容	$m/s; J/(kg \cdot K)$	S	湿周	m
c_p	定压比热容	$J/(kg \cdot K)$	T	热力学温度	K
c_v	定容比热容	$J/(kg \cdot K)$	t	摄氏温度; 时间	$^{\circ}C; s$
d	直径	m	u	流体点速	m/s
E	体积弹性模量	Pa	V	体积	m^3
F	力	N	v	比容, 平均流速	$m^3/kg, m/s$
F_f	摩擦力	N	Γ	速度环量	m^2/s
F_p	总压力; 浮力	N	γ	体膨胀系数	$1/K$
F_R	阻力	N	Δ	绝对粗糙度	m
F_τ	切向力	N	δ	边界层厚度	m
G	重力	N	ζ	局部阻力系数	
H	水头	m	η	动力粘度	$Pa \cdot s$
h	高度、淹没深度	m	κ	定熵指数	
h_f	摩擦水头损失 (沿程水头损失)	m	λ	摩擦阻力系数 (沿程阻力系数)	
h_j	局部水头损失	m	μ	流量系数	
h_w	总水头损失	m	ν	运动粘度	m^2/s
J	水力坡度		ρ	密度	kg/m^3
l	长度	m	σ	表面张力	N/m
m	质量	kg	τ	切应力	Pa
p	压力	Pa	φ	速度势函数	m^2/s
p_g	表压力	Pa	ψ	流函数	m^2/s
p_0	大气压力; 滞止压力	$Pa; Pa$	θ	旋转角度	rad/s
p_v	真空度 (真空压力)	Pa			

热工理论主要符号表

符号	名称	单位	符号	名称	单位
A	表面积	m^2	r	气化热, 半径, 热阻	$kJ/kg; m; m^2 \cdot K/W$
A_f	截面积	m^2	r_i	相对容积成分	
α	热扩散率	m^2/s	S	熵, 周界长	$kJ/K; m$
C_p	定压热容	J/K	s	比熵	$kJ/(kg \cdot K)$
C_v	定容热容	J/K	T	热力学温度	K
c	质量比热容; 流速	$J/kg \cdot K; m/s$	T_{cr}	临界温度	K
c'	容积比热容	$J/m^3 \cdot K$	T_f	流体温度	K
c_m	摩尔比热容	$J/(kmol \cdot K)$	T_l	液体温度	K
c_p	定压比热容	$J/(kg \cdot K)$	T_s	饱和温度	K
c_v	定容比热容	$J/(kg \cdot K)$	T_w	壁面温度	K
D	过热度	K	T_∞	无穷远 (来流) 温度	K
d	直径, 含湿量	$m; g/kg$	U	内能	kJ
E_k	分子平均动能	J	u	比内能	kJ/kg
Ex	焓	kJ	V	体积	m^3
ex	比焓	kJ/kg	V_m	摩尔体积	m^3/mol
F	力	N	v	比容	m^3/kg
f	汽泡发生频率	$1/s$	W	功	kJ
G	重力, 入射辐射	$N; J/(m^2 \cdot s)$	w	比功; 流速	$kJ/kg; m/s$
g_i	相对质量成分		w_s	技术功	kJ/kg
H	焓	kJ	w_i	耗散功	kJ/kg
h	比焓; 高度	$kJ/kg; m$	z	位置高度	m
J	有效辐射	$J/(m^2 \cdot s)$	α	对流换热系数; 吸收系数	$W/m^2; -$
k	传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$	γ	体膨胀系数	$1/K$
L	辐射亮度	$W/(sr \cdot m^2)$	δ	厚度	m
l	长度	m	ϵ	发射率 (黑度); 能级; 压缩比	
M	物质的摩尔质量, 辐射出射度	$kg/kmol; W/m^2$	ϵ_λ	光谱发射率	
M_0	黑体辐射出射度	W/m^2	η	动力粘度	$Pa \cdot s$
m	质量	kg	η_f	翅片 (肋) 效率	
N	管子数		η_i	热效率	
n	物质的量; 管子数	$mol; -$	θ	温度; 过余温度	K
P	压力	Pa	κ	定熵指数	
Q	热量	J	λ	导热系数; 波长; 升压比	$W/(m \cdot K); \mu m$
q	单位质量热量; 热流密度	$J/kg; W/m^2$	ν	运动粘度	m^2/s
q_f	摩擦热	J/kg	ρ	密度; 反射系数; 预膨比	kg/m^3
q_l	单位管长热损失	W/m	ρ_0	绝对湿度	kg/m^3
q_m	质量流量	kg/s	σ	表面张力; 斯蒂芬-玻尔兹曼常数	$N/m; W/(m^2 \cdot K^4)$
q_v	体积流量	m^3/s	τ	时间; 透射系数	$s; -$
q_v	单位体积的发热率	$J/m^3 \cdot s$	Φ	热流量	W
R	气体常数; 盘管半径	$kJ/(kg \cdot K); m$	φ	散热系数; 相对湿度	$-; \%$
R_0	通用气体常数	$kJ/(kmol \cdot K)$			

目 录

流体力学理论基础的主要符号表

热工理论基础的主要符号表

第一部分 流体力学理论基础

第一章 概论	3
§ 1-1 流体力学的研究对象	3
§ 1-2 流体的主要物理性质	3
§ 1-3 作用在流体上的力	10
习题	11
第二章 流体静力学	12
§ 2-1 流体静压力的特性	12
§ 2-2 流体平衡微分方程式	13
§ 2-3 流体平衡微分方程式的积分	14
§ 2-4 等压面	15
§ 2-5 重力作用下的流体平衡	17
§ 2-6 在旋转容器中的液体平衡	24
§ 2-7 作用在平面上的流体总压力	26
§ 2-8 作用在曲面上的流体总压力	28
§ 2-9 阿基米德原理 潜体和浮体的平衡	30
习题	33
第三章 流体运动的基本方程	36
§ 3-1 研究流体运动的两种方法	36
§ 3-2 迹线、流线、流束、有效断面、流量和平均流速	38
§ 3-3 连续性方程式	41
§ 3-4 理想流体的运动微分方程式	43
§ 3-5 理想流体微小流束的伯努利方程式	44
§ 3-6 粘性总流的伯努利方程式	49
§ 3-7 总流的动量方程式	53
习题	56
第四章 量纲分析和相似原理	59
§ 4-1 量纲分析	59
§ 4-2 相似原理	63
习题	67
第五章 流动型态 管内流动	69

§ 5-1 流动的两种型态	69
§ 5-2 管内流动阻力的两种类型	73
§ 5-3 均匀流动的基本方程式	73
§ 5-4 圆管中的层流	74
§ 5-5 湍流运动概述	77
§ 5-6 湍流的摩擦水头损失	81
§ 5-7 局部水头损失	86
§ 5-8 管道的水力计算	92
§ 5-9 管中的水击现象	97
§ 5-10 气蚀现象	100
习题	100
第六章 孔口和管嘴的出流	103
§ 6-1 孔口出流	103
§ 6-2 管嘴出流	107
习题	111
第七章 平面对流运动与涡旋运动	113
§ 7-1 平面流动和流函数	113
§ 7-2 无涡运动和势函数	115
§ 7-3 几种简单的平面势流	117
§ 7-4 涡旋运动的基本概念与性质	126
习题	129
第八章 粘性流体力学基本方程和缝隙流动	131
§ 8-1 粘性流体力学基本方程	131
§ 8-2 平行平板间的缝隙流动	135
§ 8-3 倾斜平板间的缝隙流动	137
§ 8-4 同心圆环缝隙中的流动	139
§ 8-5 偏心圆环缝隙中的流动	144
§ 8-6 平行圆盘缝隙间的流动	147
习题	149
第九章 边界层理论基础	150
§ 9-1 边界层的一般概念和普朗特方程	150
§ 9-2 边界层方程的相似性解法和积分关系式解法	153
§ 9-3 平板层流边界层的计算	156
§ 9-4 平板湍流边界层的计算	162
§ 9-5 二维曲面边界层方程及	

边界层分离现象 卡门涡街	165	§ 14-2 熵增原理和卡诺定理	246
§ 9-6 绕流物体的阻力	167	§ 14-3 能的品质与能的贬值	249
习题	169	§ 14-4 热力学温标	251
第十章 气体的管内流动	171	习题	253
§ 10-1 声速和马赫数	171	第十五章 基本热力循环	254
§ 10-2 非粘性气体一元流动的基本方程	173	§ 15-1 概述	254
§ 10-3 非粘性气体在变截面管中的流动	177	§ 15-2 蒸汽动力循环	254
§ 10-4 实际气体在等截面管中的流动	181	§ 15-3 气体动力循环	256
§ 10-5 激波	183	§ 15-4 致冷循环	258
习题	185	习题	261
第十一章 两相流动和非牛顿		第二篇 传热学	263
流体简介	187	第十六章 导热基础及一维稳态导热	266
§ 11-1 气液两相流动特性参数	187	§ 16-1 导热的概念及其基本定律	266
§ 11-2 气液两相流动的流型	190	§ 16-2 导热微分方程式	267
§ 11-3 气液两相流动的一般处理方法	192	§ 16-3 简单形状物体的稳态导热	268
§ 11-4 气固两相流动的形式和 极限沉降速度	193	§ 16-4 伸展体的稳态导热	274
§ 11-5 气固两相流压降的一般计算方法	195	§ 16-5 发热固体的稳态导热	281
§ 11-6 非牛顿流体	197	习题	284
参考文献	200	第十七章 对流换热基础	286
第二部分 热工理论基础		§ 17-1 对流换热的基本概念	286
第一篇 工程热力学	203	§ 17-2 牛顿冷却定律, 换热系数 α	289
第十二章 气体的热力性质	203	§ 17-3 对流换热的数学描写	291
§ 12-1 概述	203	§ 17-4 对流换热相似理论基础	296
§ 12-2 气体的状态参数	204	习题	303
§ 12-3 理想气体状态方程式	209	第十八章 单相流体的对流换热	305
§ 12-4 实际气体的性质, 水蒸汽	212	§ 18-1 管内受迫流动的对流换热	305
§ 12-5 气体的比热容	219	§ 18-2 横向外掠圆管的对流换热	310
§ 12-6 理想混合气体的性质	222	§ 18-3 流体自然运动的对流换热	313
§ 12-7 湿空气	225	习题	317
习题	227	第十九章 流体相变的对流换热	319
第十三章 能量和热力学第一定律	229	§ 19-1 沸腾换热的基本概念	319
§ 13-1 热力学第一定律的实质	229	§ 19-2 大容积沸腾换热计算	321
§ 13-2 热力学第一定律的解析表达式	229	§ 19-3 蒸汽凝结换热	325
§ 13-3 稳定流动能量方程式	231	习题	329
§ 13-4 气体的基本热力过程	233	第二十章 辐射换热	330
§ 13-5 多变过程及多变分析法	238	§ 20-1 热辐射的基本概念	330
习题	244	§ 20-2 热辐射的基本定律及应用	332
第十四章 能质和热力学第二定律	245	§ 20-3 黑体表面间的辐射换热	336
§ 14-1 热力学第二定律	245	§ 20-4 灰体面间的辐射换热	339
		§ 20-5 辐射换热系数	344
		§ 20-6 减弱辐射换热量的方法	345
		§ 20-7 气体热辐射	348

习题.....	352	附表 5 未饱和水与过热水蒸汽.....	372
第二十一章 传热和热交换器	354	附表 6 气体的平均定压质量比热容.....	372
§ 21-1 换热器的分类.....	354	附表 7 气体的平均定容质量比热容.....	374
§ 21-2 传热过程及传热系数.....	355	附表 8 气体的平均定压容积比热容.....	375
§ 21-3 换热器设计与计算.....	358	附表 9 气体的平均定容容积比热容.....	376
习题.....	366	附表 10 饱和水的物性参数.....	377
附录	368	附表 11 气体的物性参数.....	378
附表 1 气体常数和低压下比热.....	368	附表 12 几种材料的密度、导热系数、 比热容和热扩散率.....	379
附表 2 某些常用气体在理想气体状态下的 定压比热容与温度的关系.....	368	附表 13 常用材料的表面发射率(黑度).....	380
附表 3 饱和水与饱和蒸汽表(依温度 排列)	369	附表 14 油类的物性参数.....	381
附表 4 饱和水与饱和蒸汽表(依压力 排列)	370	附表 15 大气压力 ($P = 101325\text{Pa}$) 下过热 水蒸气的物性参数.....	382
		参考文献	382

第一部分 流体力学理论基础

第一章 概 论

§ 1-1 流体力学的研究对象

流体力学是研究流体平衡和运动规律的科学。

流体是液体和气体的统称，其基本特征是在任何微小剪切力的作用下，都将连续不断地变形。流体的这种性质也称为易流动性，它是区别流体与固体的主要特征。至于液体与气体的主要差别则在于液体具有固定的体积，在容器中能够形成一定的自由表面，很不容易被压缩，而气体则没有固定的体积，总是充满容纳它的整个容器，很容易被压缩。

从物理学知道，流体是由大量的流体分子组成的，这许多的分子永远处于无规则的热运动状态中，所以要想追踪每一个分子，详细地去研究分子的微观运动是困难的。由于流体力学的任务不是研究流体分子的微观运动，而是研究整个流体的宏观机械运动，因此在流体力学中引入了流体具有连续性的假设，认为流体是彼此之间没有空隙存在，完全充满所占空间，并且由没有微观运动的无数流体质点所组成的连续介质。这样，在流体力学中，流体就是一种连续的流体介质。

引入连续介质的模型是十分合理的。在工程实际中，需要流体力学解决的问题，一般都具有较大的尺寸，其最小的尺寸亦远大于流体分子的平均自由行程而包含庞大数量的分子。例如，在标准状态（ 0°C ，1标准大气压 $\ominus$ ）下， 1mm^3 的气体中有 2.7×10^{18} 个分子， 1mm^3 的液体中有 3×10^{21} 个分子。所以根据连续介质这一假设来研究流体力学问题，可以得出完全合乎实际要求的解答。此外，引入连续介质的模型可以大大简化流体的平衡和运动的研究，它使得流体介质的一切力学特性如密度、速度和压力等，都可以被看作是坐标和时间的连续函数，因而在解决流体力学的实际问题时，就能利用连续函数这一有力的数学工具。需要指出的是对于某些特殊情况，如稀薄气体的流动，连续介质的假设将不再适用。

本书采用国际单位制，即 SI 单位制。在国际单位制中有 7 个基本单位，其中与一般流体力学有关的有 4 个，即长度单位为米（m），质量单位为千克或公斤（kg），时间单位为秒（s），热力学温度单位为开〔尔文〕（K）。物理量（测量）单位的种类称为量纲或因次，有关单位和量纲的问题详见第四章。

§ 1-2 流体的主要物理性质

在研究流体的平衡和运动规律时，必须知道流体的物理性质。下面就影响流体运动的主要物理性质分别加以说明。

一、密度

流体和自然界其它物体一样，具有质量。流体的这种性质用流体单位体积内所具有的质量，即密度来表示。

$\ominus$ 1 标准大气压 = 101325Pa 。

对于均质流体

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

式中 ρ ——流体的密度;

m ——流体的质量;

V ——流体的体积。

对于非均质流体, 因为各点处的密度不同, 所以按上式计算的只是流体的平均密度。若令 ΔV 代表某点附近的微小体积, Δm 代表该微小体积中的质量, 则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

密度 ρ 的单位为 kg/m^3 。

单位质量流体具有的体积, 称为比容 v 。对于均质流体

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

比容 v 的单位为 m^3/kg 。

表 1-1 列举了一些工程中常用流体在标准大气压下的密度值。表 1-2 列举了在标准大气压下水、水银和空气的密度随温度而变化的数值。

表 1-1 常用流体的密度

流 体 名 称	温度 °C	密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	流 体 名 称	温度 °C	密度 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
蒸馏水	4	1000	空气	0	1.293
海水	15	1020~1030	氧	0	1.429
汽油	15	700~750	氮	0	1.251
石油	15	880~890	氢	0	0.090
润滑油	15	890~920	一氧化碳	0	1.250
酒精	15	790~800	二氧化碳	0	1.976
水银	0	13600			

表 1-2 不同温度下的水、水银和空气的密度

单位: kg/m^3

流体名称	温度/°C						
	0	10	20	40	60	80	100
水	999.87	999.73	998.23	992.24	983.24	971.83	958.38
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350
空气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94

二、压缩性和膨胀性

(一) 压缩性

当温度不变时, 流体体积随压力增加而缩小的性质称为流体的压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来度量, 它表示增加一个单位压力时所引起的体积相对缩小量, 即

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-4)$$

式中 κ ——流体体积压缩系数;

V ——流体原有的体积；

dV ——流体体积的变化量；

dp ——压力的增量。

由于压力增加，流体体积缩小， dp 与 dV 异号，故上式中加一负号，以使 κ 为正值。流体的压缩性也常用 κ 的倒数 E 来衡量， E 称为流体的体积弹性系数或体积弹性模量。

$$E = \frac{1}{\kappa} = - \frac{V dp}{dV} \quad (1-5)$$

从上式可见， E 值大的流体的压缩性小， E 值小的流体的压缩性大。 E 的单位为 N/m^2 。

表 1-3 列举出水的体积弹性模量 E 。

表 1-3 水的体积弹性模量

单位： GN/m^2

温度 °C	压力/MPa				
	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

从上表可以看出，水的体积弹性模量很大，即它的压缩性很小。与水类似，其它液体的压缩性也很小。在工程上一般可以认为液体是不可压缩的。

(二) 膨胀性

当压力不变时，流体体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。膨胀性的大小用体积膨胀系数 γ 来度量，它表示增加一个单位温度时所引起的体积相对增大量，即

$$\gamma = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-6)$$

式中 γ ——流体体积膨胀系数；

dt ——流体温度的增量。

表 1-4 列出了在不同温度和不同压力下，水的体积膨胀系数 γ 。

表 1-4 水的体积膨胀系数 γ

单位： $1/^\circ C$

压力/MPa	温度/ $^\circ C$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.1	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
10	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
20	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	—

从上表可以看出，水的膨胀系数很小，其它液体也有类似的特性。在工程上，当温度变化不很大时，一般可以不考虑液体的膨胀性。

气体的情况较液体的复杂，压力和温度的变化对气体密度的影响很大，第十章和热工理论基础部分将作较为详细的讨论。

根据流体的密度或体积随温度和压力而变化的不同程度，通常把流体分为不可压缩流体和可压缩流体两种。对于液体，由于其密度随温度和压力的变化量很小，所以在实际情况下，

当温度和压力的变化不大时,可以认为其体积不发生变化,密度为常量,即可把液体看作为不可压缩流体。气体的密度随温度和压力有很大的变化,是可压缩流体。但是,在许多工程实际问题中,也可以把气体作为不可压缩流体看待。可以证明,在气体相对于固体的流动中,以及物体在静止气体内运动的过程中,只要其速度比声速小较多,则气体密度的变化是很小的。例如,在标准状态下,空气在地球表面附近的密度变化(与未被扰动的气流比较),在速度为 50 m/s 时,比 1% 稍大一些。所以在上述前提下,我们可以忽略密度的变化,把气体看成是不可压缩流体。

三、粘性

运动着的流体,如果各流体层的速度不相等,那末相邻的两个流体层之间的接触面上,将形成一对阻碍两流体层相对运动的等值而反向的摩擦力。这种力叫做内摩擦力,流体的这种性质,叫做粘性。

设有两块平行平板,其间充满流体(见图 1-1)。假定下板固定,上板以某一速度 u_0 向右移动。可以认为,由于流体与板间的附着力,紧贴板面的流体将附着在板面上具有与板相同的速度。因此,紧贴在上板的一层流体,将以 u_0 随上板向右运动,而紧贴在下板的一层流体将和下板一样静止不动,介于两板之间的各层流体,将以自上而下逐层递减的速度向右运动。流动较快的流体层带动流动较慢的流体层;反之流动较慢的流体层却又阻滞运动较快的流体层,从而在流体层之间产生内摩擦力。

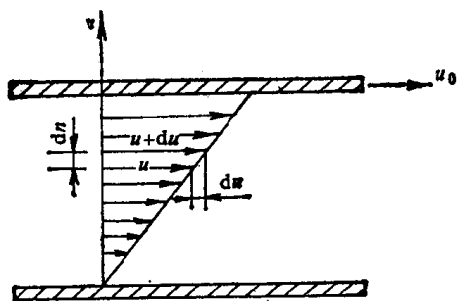


图1-1 流体层间内摩擦力实验

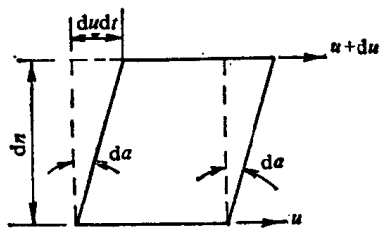


图1-2 流速梯度

由牛顿首先提出,并经后人试验证明,流体运动所产生的内摩擦力与流层接触面的面积以及沿接触面法线方向的速度梯度成正比,与流体的物理性质有关,而与接触面上的压力无关。这个关系称为牛顿内摩擦定律,其数学表达式为

$$F_{\tau} = \eta A \frac{du}{dn} \quad (1-7)$$

式中 F_{τ} ——流体层接触面上的内摩擦力;

A ——流体层之间的接触面积;

$\frac{du}{dn}$ ——沿接触面法线方向的速度梯度;

η ——表示流体物理性质的一个比例系数,称为动力粘度。

单位面积上的内摩擦力即切应力 τ 为

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{A} = \eta \frac{du}{dn} \quad (1-8)$$

在运动流体中，内摩擦力或切应力总是成对出现的，它们的大小相等、方向相反。

流体静止时，速度梯度 $\frac{du}{dy} = 0$ ，所以不呈现切应力。

在流体力学中还常用动力粘度 η 和密度 ρ 的比值来表示粘性的大小，这个比值称为运动粘度，并用符号 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-9)$$

动力粘度 η 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，运动粘度 ν 的单位为 m^2/s 。

在工程中，动力粘度和运动粘度还常采用下面的计量单位。

动力粘度的单位为泊(Poise)，其代号为P，百分之一泊称为厘泊(cP)， $1\text{P} = 10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{s}$ ， $1\text{cP} = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。运动粘度的单位为斯托克斯(Stokes)，其代号为St，百分之一斯托克斯称为厘斯托克斯(cSt)， $1\text{St} = 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ， $1\text{cSt} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

由式(1-8)可知切应力 τ 的大小取决于速度梯度和粘度，而速度梯度可理解为角变形速度。设在 t 时刻取一长方形流体微元平面(见图1-2)。因上层与下层的流速不等，经过 dt 时间后，这个微元平面由原来的直角长方形变为锐角斜方形，角度减小了 da ， $\frac{da}{dt}$ 就是角变形速度，它可表示如下

$$\frac{da}{dt} \approx \frac{\text{tg}(da)}{dt} = \frac{\frac{du}{dy} \cdot dt}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

由此可知切应力正比于角变形速度。

流体粘度的数值与温度和压力有关，但普通的压力对粘度的影响极微，可以认为流体粘度只随温度而变化。

表1-5和表1-6列出水和空气在标准大气压下不同温度时的动力粘度 η 和运动粘度 ν 。

表1-5 水和空气的动力粘度 η

单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	40	60	80	100
水	1.792×10^{-3}	1.308×10^{-3}	1.005×10^{-3}	0.656×10^{-3}	0.469×10^{-3}	0.357×10^{-3}	0.284×10^{-3}
空气	17.09×10^{-6}	17.60×10^{-6}	18.08×10^{-6}	19.04×10^{-6}	19.97×10^{-6}	20.88×10^{-6}	21.75×10^{-6}

表1-6 水和空气的运动粘度 ν

单位: m^2/s

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	60	80	100
水	1.792×10^{-6}	1.308×10^{-6}	1.007×10^{-6}	0.804×10^{-6}	0.661×10^{-6}	0.477×10^{-6}	0.367×10^{-6}	0.296×10^{-6}
空气	13.20×10^{-6}	14.10×10^{-6}	15.00×10^{-6}	16.00×10^{-6}	16.90×10^{-6}	18.80×10^{-6}	20.90×10^{-6}	23.00×10^{-6}

凡遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。实验证明，大多数气体、水和其它液体以及低分子量物质的溶液都属牛顿流体的范畴。凡不遵循牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体，见第十一章的介绍。

自然界中的流体都是有粘性的。由于粘性的存在使流体运动的研究变得非常复杂。为了便于进行理论分析，在流体力学中提出了非粘性流体的概念。所谓非粘性流体就是忽略了粘

性的流体, 也叫做理想流体, 而把具有粘性的真实流体叫做粘性流体或实际流体。研究非粘性流体的运动, 可以大大简化理论分析的过程, 容易得出一些结果。如果在实际流动中, 粘性的影响可以忽略, 则上述结果可以直接加以应用。如果粘性的影响必须考虑时, 则可以专门对粘性的作用进行理论分析或实验研究, 然后再对上述结果加以修正和补充, 使实际问题得到解决。这是流体力学中处理复杂问题的一种方法。

四、表面张力、润湿现象及毛细现象

(一) 表面张力

从物理学知道, 在液体的表面层中, 每个分子都受到垂直于液面并且指向液体内部的不平衡力。在这种力的作用下, 液体表面层中的分子有尽量挤入液体内部的趋势, 因而液体要尽可能地缩小它的表面面积。在宏观上, 液体表面就好像是拉紧了弹性膜, 处在沿着表面的、使表面有收缩倾向的张力作用之下, 这种力叫做液体的表面张力。

表面张力的大小以作用在单位长度上的力, 即表面张力系数 σ 表示, 它的单位为 N/m 。

表 1-7 中给出某些液体在空气中的表面张力系数值。

表 1-7 液体的表面张力系数

液体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	表面张力系数 $\sigma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	液体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	表面张力系数 $\sigma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$
水	20	72.75×10^{-3}	酒精	20	22.3×10^{-3}
水银	20	465×10^{-3}	丙酮	16.8	23.4×10^{-3}
四氯化碳	20	25.7×10^{-3}	甘油	20	65×10^{-3}

(二) 润湿现象

液体和固体相接触时, 有些液体能够润湿固体, 有些液体却不能润湿固体。如果液体分子与固体分子之间的相互吸引力 (称为附着力), 大于液体分子之间的相互吸引力 (称为内聚力), 就产生液体能润湿固体的现象, 如图 1-3 a 所示; 如果附着力小于内聚力, 就产生液体不能润湿固体的现象, 如图 1-3 b 所示。

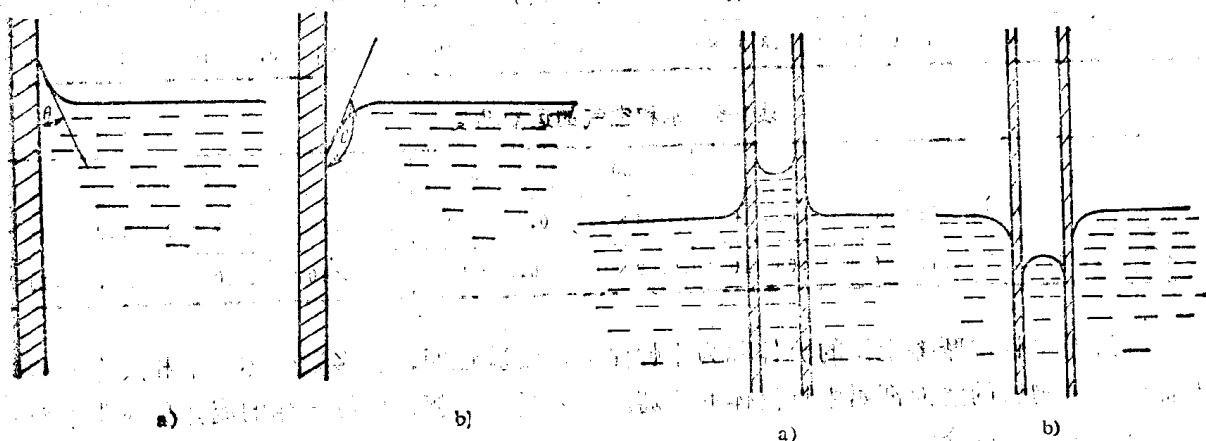


图 1-3 液体与固体的相互接触

a) 液体润湿固体 b) 液体不润湿固体

图 1-4 液体与管内外壁的相互接触

a) 液体润湿管壁 b) 液体不润湿管壁

由图 1-3 a、b 可知, 对于能润湿固体的液体, 接触角 (在液体和固体接触处, 液体表面的切面和固体表面所成的角) 是锐角

($\theta < \frac{\pi}{2}$), 对于不能润湿固体的液体, 接触

角是钝角 ($\theta > \frac{\pi}{2}$)。水与玻璃的接触角约为

8.5° , 水银与玻璃的接触角约为 140° 。

在圆柱形的管子里, 能润湿固体的液体表面呈凹形, 见图 1-4 a, 不能润湿固体的液体表面呈凸形, 见图 1-4 b。

(三) 毛细现象

将毛细管插入液体内, 管内外液面会产生高度差。如果液体能润湿管壁, 则管内液面升高; 如果液体不能润湿管壁, 则管内液面下降。这种现象叫做毛细现象。

现在来研究毛细管内液面上升的规律。图 1-5 所示为液体能润湿管壁的情况, 管中呈凹形液面。若液体与管壁的接触角为 θ , 则在平衡状态下, 应有如下的关系。

$$\sigma \cos \theta \pi d = \rho \frac{\pi d^2}{4} h g$$

由此可得液体在管中上升的高度 h 为

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d} \quad (1-11)$$

式中 σ ——液体表面张力系数;

d ——毛细管的内径。

在液体不能润湿管壁的情况下, $\theta > \frac{\pi}{2}$, 此时 h 为负值, 表示管内液面下降。

表 1-8 中列举出几种液体在玻璃圆截面毛细管和玻璃平行板间缝隙上升或下降的高度。

表 1-8 液体在毛细管中上升或下降的高度

液体种类	玻璃毛细管内径为 d 时	平行玻璃板间距离为 b 时	液体种类	玻璃毛细管内径为 d 时	平行玻璃板间距离为 b 时
水	$30/d$	$15/b$	甲苯	$13/d$	$6.5/b$
酒精	$10/d$	$5/b$	水银	$-10/d$	$-5/b$

在测量压力和测量液位时, 由于存在毛细现象, 将会产生一定的误差; 因此对测管的管径有一定的要求。对于单管差压计, 当作精密测量时, 如果工质为水, 则管的内径不得小于 15mm ; 如果工质为水银, 则管的内径不得小于 20mm 。对于一般的 U 型差压计, 由于受体积的限制, 管内径不宜做得太大, 通常约为 8mm 。

五、蒸发与气体溶解

(一) 蒸发

液体表面的汽化现象叫做蒸发。在流体力学的一般问题中, 不必考虑蒸发的影响。但是对于流量计量, 特别是在广口计量容器或称量水箱进行较长时间的计量时, 往往必须计及蒸

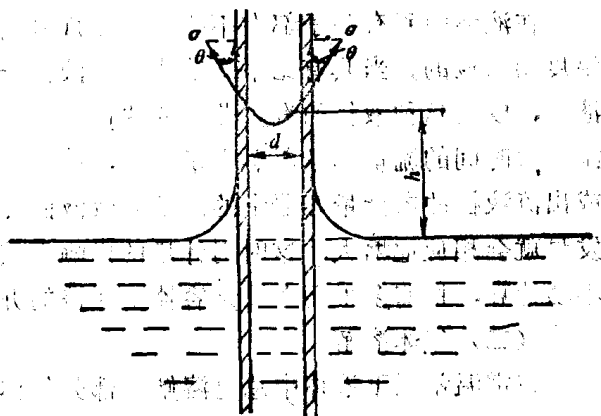


图 1-5 毛细管中液体上升的高度