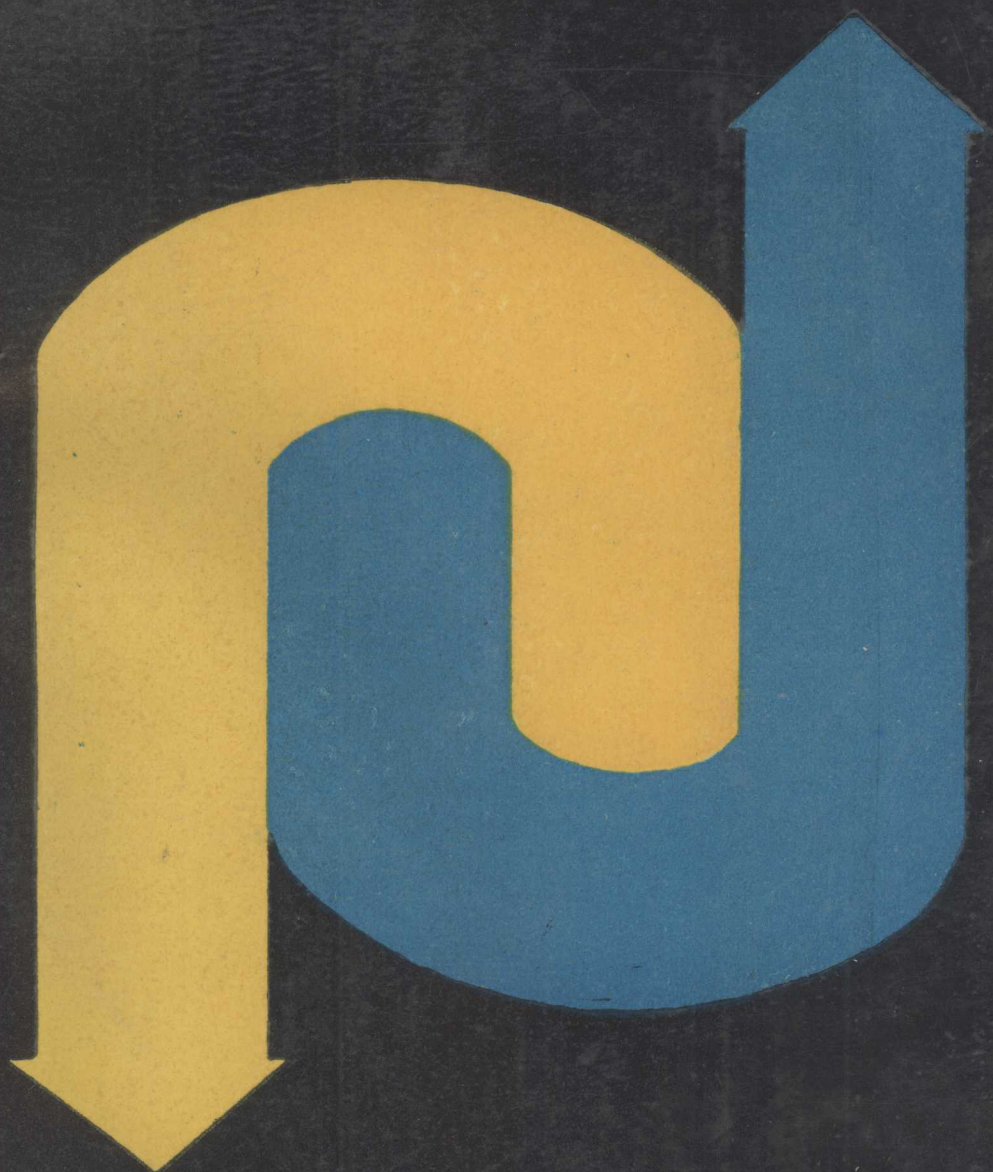


高等院校试用教材

工程流体力学

于荣宪 王文琪 蔡体菁 张唯一



东南大学出版社

高等院校试用教材

工程流体力学

于荣宪 王文琪 蔡体菁 张维一

东南大学出版社

(苏)新登字第 012 号

林慧田为副参高

内容提要

本书是在总结历年教学改革经验、吸收国内外先进教材优点的基础上编写的。采用以积分控制体分析、微分分析、量纲分析为主,按专题(粘流和过粘流、可压和不可压流、内流和外流等)讨论的体系。课堂教学与电化手段相结合。还引进了计算机辅助教学,增加了计算流体力学内容,以训练计算机数值模拟能力。

责任编辑 施 恩

一 蔡 荣 王 文 琪 蔡 体 菁 张 维 一

工程流体力学

于荣宪 王文琪 蔡体菁 张维一

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210018)

东南大学激光照排中心排版

南京市溧水县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 33 字数 760 千

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7-81023-961-9/TK·4

定价:22 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

工程流体力学是一门在各种工程中有着广泛应用的技术基础课。课程体系一直沿用由一维流动到三维流动或从三维流动到一维流动,前者着重学科的发展符合从简单到复杂的规律,后者着眼于数学推理的严谨和方便。

我们在总结多年的教学经验后认为:对工科大学生来说最重要的是,使其获得工程师的基本训练,即掌握流体力学的基本理论,学会分析和解决实际问题的能力。为此,我们在总结教学经验,吸取国内外先进教材优点的基础上,采用了以三种分析方法(积分控制体分析、微分分析、量纲分析)为主体,按专题(粘流和无粘流、可压和不可压流、内流和外流等)讨论的体系。使之寓理论于分析方法之中,在学习理论的同时训练解决工程实际问题的能力。

大学本科生的工程流体力学课程应该是分析、计算和实验并重。目的则为培养有分析能力,造就会思考的智力型人材。但有了分析、思考的头脑,还须有动手能力,去进行实验和计算。熟悉相似原理和量纲分析方法,为从事科学试验打下坚实的基础。应用计算机求解流体力学的流动问题和微分方程,为以后解决更复杂的工程问题奠定基础。本教材力图在理论与实践结合方面能处理得更好些。

引入现代化的教学手段,是本教材的又一特色。在课堂上根据授课内容,随时播放教学影片、录相片、幻灯片,使一些抽象概念得以理解。将计算机辅助教学(CAI)纳入流体力学教学中,人机对话式地改变各种参数,显示千变万化的状态,使基本概念得以深化和扩展。流体力学的计算方法安排了专门内容,以提高学生的计算机数值模拟能力。

总之,这本教材在体系、内容和教学方法上都有些新的尝试,在教学实践中也受到同学的欢迎。它是在多年教学中逐步探索改进,再探索再改进后的总结,希望使工程流体力学的教学能赶上时代发展的步伐。但毕竟由于科学技术,特别是计算机技术发展的突飞猛进,加之我们的水平有限,书中会有许多不妥之处,欢迎专家、教师、学者批评指正。

参加本书编写的有东南大学动力工程系的于荣宪(1.2.6.7.9章)、王文琪(3.4.5章)、蔡体菁(8.11章)、张维一(10章),并由荣宪主编。东北电力学院薛祖绳教授和河海大学赵光恒教授审阅了本书并提出了许多宝贵建议,在此深表谢意。

工程流体力学课程作为东南大学的重点建设课程,一直得到我校教务处、电教中心的支持和帮助,特别在编写本书过程中得到东南大学出版社的大力协作,借此机会表示真诚的感谢。

编 者

1993.12

目 录

第一章 绪论	1
第一节 流体的定义和特征	1
第二节 流体力学研究对象及其在工程中的应用	1
第三节 流体作为连续介质的假设	2
第四节 量纲和单位	2
第五节 流体的密度	7
第六节 流体的压缩性和膨胀性	10
第七节 流体的粘性	13
第八节 液体的表面张力	21
小结	23
思考题	24
习 题	24
习题答案	27
第二章 流体静力学	29
第一节 作用在流体上的力	29
第二节 流体平衡微分方程式	31
第三节 流体内的压强分布	34
第四节 静压强用液柱测量	38
第五节 静止流体对壁面的压力	43
第六节 流体的相对平衡	50
小结	57
思考题	58
习 题	61
习题答案	70
第三章 流动分析基础	72
第一节 流场的描述方法	72
第二节 速度场的图示	74
第三节 流体质点的运动	81
第四节 流体运动的分类	96
第五节 流动的分析方法	101
小结	101
思考题	102
习 题	102
习题答案	106
第四章 流动的控制体分析	108
第一节 系统和控制体	108

第二节	雷诺输运定理	110
第三节	质量守恒定律	115
第四节	线动量原理	119
第五节	角动量原理	139
第六节	能量守恒定律	144
小结	.....	159
思考题	.....	160
习 题	.....	160
习题答案	.....	172
第五章	流动的微分分析	175
第一节	微分形式的质量守恒方程	175
第二节	微分形式的动量守恒方程	178
第三节	定常欧拉运动微分方程的积分	191
第四节	微分形式的能量守恒方程	196
第五节	基本方程的边界条件和初始条件	200
小结	.....	203
思考题	.....	203
习 题	.....	204
习题答案	.....	207
第六章	量纲分析和相似	209
第一节	概述	209
第二节	量纲分析	210
第三节	量纲分析的应用	212
第四节	相似原理	215
第五节	模型试验	219
第六节	基本微分方程的无量纲化	227
小结	.....	229
思考题	.....	229
习 题	.....	230
习题答案	.....	234
第七章	粘性不可压缩流体内部流动	236
第一节	流体流动的状态	236
第二节	圆管内层流	237
第三节	平行平板间和环形管内层流	243
第四节	圆管内湍流	249
第五节	管内流动的能量损失	259
第六节	管路计算	273
第七节	流体流速测量	279
第八节	流体体积流量测量	285
小结	.....	291
思考题	.....	291

习 题	292
习题答案	299
第八章 粘性不可压缩流体外部流动	301
第一节 边界层	301
第二节 边界层厚度	302
第三节 层流边界层微分方程及布拉休斯解	304
第四节 动量方程与表面摩擦阻力	307
第五节 平板流动的转换	312
第六节 湍流边界层 光滑平板	314
第七节 光滑平板湍流边界层表面摩擦阻力	316
第八节 粗糙平板湍流边界层表面摩擦阻力	318
第九节 绕曲面流动及边界分离 圆柱体后尾迹	320
第十节 绕流(浸没)物体的阻力	323
小结	328
思考题	329
习 题	329
习题答案	332
第九章 可压缩流体的流动	334
第一节 声速 马赫数	334
第二节 气体一元等熵流动	337
第三节 喷管中的等熵流动	344
第四节 有摩擦的绝热管流	351
第五节 有热交换无摩擦管流	355
第六节 超声速气流的绕流与激波的形成	359
第七节 激波前后气流参数的关系	362
第八节 缩放喷管的变工况工作	370
小结	372
思考题	373
习 题	373
习题答案	377
第十章 不可压缩流体的无粘流动	379
第一节 有旋流动的运动学特性	379
第二节 凯尔文速度环量定理	381
第三节 不可压缩流体平面流动函数和无旋流动的速度势	384
第四节 基本平面势流	387
第五节 几种简单的平面势流的叠加	391
第六节 绕闭合形状物体的流动	395
第七节 虚拟质量力	406
小结	411
思考题	411
习 题	411

习题答案	414
第十一章 计算流体力学简介	416
第一节 数值微分与数值积分	416
第二节 常微分方程数值分引论	419
第三节 常微分方程表示的流动问题	420
第四节 定常流动边值问题引论	430
第五节 势流	433
第六节 管道中粘性不可压缩流体的层流	434
小结	436
习 题	437
附录	438
附录一 计算机辅助教学	438
附录二 计算机数值模拟	466
附录三 工程流体力学课堂教学插播片	511
附录四 中英文术语索引	514
参考文献	519

第一章 绪 论

第一节 流体的定义和特征

流体是能流动的物质。从其力学特征看,它是受到任何微小剪切力的作用都能导致其形状发生连续变化的物质。流体与固体相比,其分子间内聚力小,容易变形,具有流动性。

流体按其状态,有液体和气体两种状态。因此,流体是液体和气体的统称。

液体随其所在容器的形状而改变形状。在相当大的外力作用下,其体积几乎不变,通常称为不可压缩流体。在重力场中,液体与气体接触的交界面,称为液体的自由表面。液体分子间距离较小,分子吸引力较大,流动性比气体小。

气体总能充满它所能达到的全部空间。在外力作用下,体积极易改变,故称为可压缩性流体。气体分子间距离大,分子间吸引力微不足道,分子除互相碰撞以及与容器壁碰撞外,可以自由运动,流动性极好。

流体在外力作用下,体积发生变化的性质称为压缩性。流体的可压缩性与不可压缩性是相对而言的。液体在通常情况下是不可压缩的,但在极大外力作用下,例如液体内爆炸或水击时,要计及压缩性。气体在低速流动压强变化不大时,可不计其压缩性,但在高速流动压强变化较大时,就得按可压缩流体来计算。

流体分子间存在吸引力和动量交换,当其流动时就呈现出阻碍流动的性质,这称为流体的粘性。如果在研究流体流动时,忽略粘性的影响,而把没有粘性的流体,称为理想流体。理想流体概念的引入,大大简化了对流体流动问题的分析,便于从理论上得出一些很有用的结论。

第二节 流体力学研究对象及其在工程中的应用

流体力学是研究流体平衡和运动规律的科学。流体力学研究流体平衡条件和压力分布规律;研究流体流动的基本规律;研究流体绕过物体和流过通道时,流体的压力分布、速度分布、能量损失;研究流体与固体间的相互作用时质量、动量交换的规律。

流体力学是一门古老而又年轻的学科,它的发展始终与人类的生产斗争和科学实验分不开,始终与工程技术紧密联系在一起。流体力学在许多工程技术中得到了广泛应用。只要涉及流体的运动和流体与固体的相互作用,就要以流体力学为基础来进行分析、研究和解决工程问题。因此,流体力学在水利工程、机械、动力、化工、石油、土建、冶金、航海、航空、气象、环保等各种工程技术中,都有广泛的应用。在水利工程中,为水工和港工建筑的设计提供水压荷载。在机械工业中,为水力机械的设计提供原理;对润滑、冷却、液压传动、液压和气动控制等都需依靠流体力学的理论。在冶金工业中,也有炉内气体运动力学、液

态金属的流动等问题。在动力、化工、石油工业中,普遍存在动力机械的作用原理和油、气、水、烟气的流动问题。土建工程中的给水、排水、采暖、通风也是流体力学问题。航海的船舶和潜艇在水中的航行,航空的飞机和导弹在空气中的飞行,海洋中的波浪、潮汐,大气中的气旋、环流的季风都是流体力学问题。人体内也存在流体流动系统,例如呼吸和血液循环,因此,心肺机、助呼吸器、人工心脏等的设计也离不开应用流体力学的基本原理。

总之,流体力学,特别是以工程应用为主的工程流体力学,是诸多工业技术部门必须应用和研究的重要学科。

第三节 流体作为连续介质的假设

任何物质都是由分子组成的,分子之间存在着空隙,分子本身不停地作不规则的运动。流体不论是液体或气体也是由存在着空隙的分子组成的。从微观角度看,流体并不是连续分布的物质。如果着眼点放在研究每个分子的微观运动上,从而研究整个流体的运动,是极其复杂和困难的。流体力学通常不去研究或跟踪微观分子的运动,而是从宏观上去研究流体的运动。

1753年,欧位(L. Euler)提出了连续介质模型,从而为研究流体的宏观运动奠定了基础。他把流体看成是由连续介质组成的物质,即流体从体积上看是由微观上充分大,宏观上充分小的分子团即流体微团或流体质点组成的连续介质,流体微团或流体质点没有空隙的连续地充满其所在的空间。这样,只要我们在研究流体运动时,所取的微团或质点体积足够小,但它包含了足够多的分子,例如 1 mm^3 的体积在 101325 Pa 的 0°C 的标准状态下,含有 2.7×10^{26} 个气体分子,(在这种状态下的气体, 10^{-16} mm^3 的气体在 10^{-6} 秒内分子要碰撞 10^{14} 次)或含有 3.3×10^{23} 个水分子。使得描述流体运动属性的物理量:密度、压强、速度、温度、应力、粘度等具有统计的平均意义。用统计平均值描述流体质点的宏观性质,不考虑分子间存在空隙,而把流体看作由无数连续分布的流体微团或质点组成的连续介质,这就是流体的连续介质的假设。

在流体力学中,将流体视为连续介质来处理,因而表征流体属性的物理量:密度、压强、温度、速度、粘度、应力等也是连续分布的,在时间和空间上也是连续变化的。对于这种连续运动的流体,它的物理量就可用时间和空间坐标的单值连续可微函数表示。这样,我们就可利用微分方程来描述流体的平衡和运动规律了。

连续介质模型是流体力学的根本假设。我们依据了这个假设,才把微观问题转化为宏观问题来处理。对大部分工程技术的流体力学问题,连续介质模型都是正确的。然而,对某些特殊问题,例如稀薄气体和高真空技术中,由于分子间距与有效尺寸到了可以相比拟的程度,这时连续介质模型就不再适用了,必须舍弃,而要用分子动力论的微观方法代替。

第四节 量纲和单位

在叙述工程流体力学基本内容之前,先介绍流体力学中物理量的量纲和单位,以便于学习。下面给物理量的量纲和单位下个定义:

量纲——物理量的类别,表征物理量特性的符号。

单位——人为赋予一定大小,比较同类物理量的符号。

在力学中采用的基本量为长度 L 、质量 M 、时间 T 。若长度单位用米(m),质量单位用千克(kg),时间单位用秒(s)来表示的单位制称为国际单位制(SI);若长度单位用厘米(cm),质量单位用克(g),时间单位用秒(s)来表示的单位制称为厘米-克-秒单位制(CGS)。

随着世界科学技术的迅猛发展、国际学术交流日益频繁和现代科技信息的快速传递,以及理、工科关系的进一步密切,1960年第11届国际计量大会(Conference Generale des poids et Mesures(CGPM))通过了国际单位制(Le Systeme International d' Unites),其国际符号为 SI。它是在米制基础上发展起来的比较完善、科学、实用的单位制,可应用于各个科学技术领域及各行业,代替历史上遗留下来的各种单位制。目前世界上绝大多数国家和国际性科技组织,包括英制国家都已宣布采用。

我国的法定计量单位(国务院 1984 年命令)包括:

- (1)国际单位制的基本单位(见表 1—1);
- (2)国际单位制的辅助单位(见表 1—2);
- (3)国际单位制中具有专门名称的导出单位(见表 1—3);
- (4)国家选定的非国际单位制单位(见表 1—4);
- (5)由以上单位构成的组合形式的单位;
- (6)由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表 1—5)。

法定单位的定义、使用方法等,由国家计量局另行规定。

表 1—1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

表 1—2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 1—3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式例
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力;重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力;压强;应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能量;功;热	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率;辐射通量	瓦[特]	W	J/s
电荷量	库[仑]	C	$A \cdot s$
电位;电压;电动势	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	A/V
磁通量	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁能量密度;磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
光照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sy	J/kg

表 1—4 国家选定的非国际制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分 [小时] 天(日)	min h d	1min=60s 1h=60min=3600s 1d=24h=86400s
平面角	[角]秒 角[分] 度	($''$) ($'$) ($^{\circ}$)	$1'' = (\pi/648000)rad$ (π 为圆周率) $1' = 60'' = (\pi/10800)rad$ $1^{\circ} = 60' = (\pi/180)rad$
旋转速度	转每分	r/min	$1r/min = (1/60)s^{-1}$
长 度	海里	n mile	1n mile=1852m (只用于航程)

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
速度	节	kn	1kn=1n mile/h =(1852/3600)m/s (只用于航行)
质量	吨	t	1t=10 ³ kg
	原子质量单位	u	1u≈1.660 565 5×10 ⁻²⁷ kg
体积	升	L, (l)	1L=1dm ³ =10 ⁻³ m ³
能	电子伏	eV	1eV≈1.602 189 2×10 ⁻¹⁹ J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1 tex=1g/km

表 1—5 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号
10 ¹⁸	艾[可萨]	E
10 ¹⁵	拍[它]	P
10 ¹²	太[拉]	T
10 ⁹	吉[咖]	G
10 ⁶	兆	M
10 ³	千	k
10 ²	百	h
10 ¹	十	da
10 ⁻¹	分	d
10 ⁻²	厘	c
10 ⁻³	毫	m
10 ⁻⁶	微	μ
10 ⁻⁹	纳[诺]	n
10 ⁻¹²	皮[可]	p
10 ⁻¹⁵	飞[母托]	f
10 ⁻¹⁸	阿[托]	a

注:1. 周、月、年(年的符号为 a)为一般常用时间单位。

2. []内的字,是在不致混淆的情况下,可以省略的字。

3. ()内的字为前者的同义语。

4. 角度单位度分秒的符号不处于数字后时,用括弧。

5. 升的符号中,小写字母 l 为备用符号。

6. r 为“转”的符号。

7. 人民生活的贸易中,质量习惯称为重量。

8. 公里为千米的俗称,符号为 km。

9. 10⁴ 称为万,10⁸ 称为亿,10¹² 称为万亿,这类数词的使用不受词头名称的影响,但不应与词头混淆。

SI 基本单位是基础,由基本单位组合而成的称为 SI 导出单位,例如密度 SI 导出单位

的符号是 kg/m^3 。有些 SI 导出单位具有专门名称,例如力的 SI 导出单位符号是 $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$,它的专门名称叫牛顿,用符号 N 表示。又如压强的专门名称叫帕斯卡,用符号 Pa 表示,它的 SI 导出单位符号是 N/m^2 或 $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

在 SI 单位制中,不论是 SI 基本单位还是由 SI 基本单位表示的导出单位,都在量的量纲式中,并可由单位表示式直接把该量的量纲写出来。例如,长度(米) $\text{m} \rightarrow \text{L}$;质量(千克) $\text{kg} \rightarrow \text{M}$;时间(秒) $\text{t} \rightarrow \text{T}$;力(牛顿 $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \rightarrow \text{LMT}^{-2}$;动量(米千克每秒) $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \rightarrow \text{LMT}^{-1}$ 等等。

工程流体力学里常用物理量的单位的量纲列在表 1—6 中。

表 1-6 常用物理量的单位和量纲

物理量	CGS 单位	SI 单位	量 纲
长度	cm	m	L
质量	g	kg	M
时间	s	s	T
速度	cm/s	m/s	LT^{-1}
加速度	cm/s^2	m/s^2	LT^{-2}
角速度	rad/s	rad/s	T^{-1}
密度	g/cm^3	kg/cm^3	ML^{-3}
力	dyn ($\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$)	N ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)	MLT^{-2}
应力 压强	dyn/cm^2 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}^2$)	Pa (N/m^2)	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
功、能、热量	erg ($\text{dyn} \cdot \text{cm}$)	J ($\text{N} \cdot \text{m}$)	ML^2T^{-2}
功率	erg/s	W (J/s)	ML^2T^{-3}
动量	$\text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}$	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$	MLT^{-1}
力矩	erg ($\text{dyn} \cdot \text{cm}$)	J ($\text{N} \cdot \text{m}$)	ML^2T^{-2}
动力粘(度)性系数	P ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$)	$\text{Pa} \cdot \text{s}$ ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$
运动粘(度)性系数	st (cm^2/s)	m^2/s	L^2T^{-1}
表面张力系数	dyn/cm	N/m	MT^{-2}

例题 1-1 1)动力粘度在 CGS 单位制中用 P 而在 SI 单位制中用 $\text{Pa} \cdot \text{s}$,试证明: $1P = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

2)压强在 SI 单位制中用 Pa ,而工程上表示微压时,常用 mmHg 和 mmH_2O ,试证明: $1\text{mmHg} = 133.3224\text{Pa}$, $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$ 。

解 为了把非 SI 单位换算到 SI 单位,只要将非 SI 单位都用 SI 基本单位表示,并加上换算系数即可。

$$\begin{aligned} 1) \quad 1P &= 1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = \left(\frac{\text{dyn}}{\text{N}} \right) \left(\frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2} \right) \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \\ &= \left(\frac{\text{dyn}}{10^5 \text{dyn}} \right) \left(\frac{10^4 \text{cm}^2}{\text{cm}^2} \right) \text{Pa} \cdot \text{s} \\ &= 0.1 \text{Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

2) 在真空技术中压强用 Torr, $1 \text{Torr} \triangleq 1 \text{mmHg}$, 而 $1 \text{atm} = 101325 \text{Pa} = 760 \text{mmHg}$, 故

$$1 \text{Torr} \triangleq 1 \text{mmHg} = (101325/760) = 133.3224 \text{Pa}$$

$$\text{又} \quad 1 \text{at} = 1 \text{kgf/cm}^2 = 1 \text{kgf}/10^{-4} \text{m}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{N/m}^2$$

$$\text{而} \quad 1 \text{at} = 10 \text{mmH}_2\text{O} = 10^4 \text{mmH}_2\text{O}$$

$$\text{故} \quad 1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{N/m}^2 = 9.80665 \text{Pa} \approx 10 \text{Pa}$$

第五节 流体的密度

流体的密度表征流体在空间某点质量的密集程度。流体中围绕某点的微元体积 ΔV , 其中流体质量为 ΔM 。当体积无限小而趋近一点时, 定义一点上流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-5-1)$$

一点上流体比容为

$$v = \lim_{\Delta M \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta M} = \frac{dV}{dM} \quad (1-5-2)$$

这里 $\Delta V \rightarrow 0$ 取极限, 应从物理上理解为体积缩小为无穷小的流体质点, 却包含有足够的分子, 而不失去把流体当作连续介质处理的基础。不同点上的 ρ, v 都随各点的压强和温度而变化。

如果流体是均质的(本书研究的流体都为均质流体), 那末流体密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-5-3)$$

流体比容是体积 V 与质量 M 的比

$$v = \frac{V}{M} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-5-4)$$

均质流体是指质量分布在空间里是均匀的, 但流体密度、比容仍可随温度和压强而变化。液体的密度随温度的不同略有变化, 而对压强的变化影响不大, 因此在通常情况下, 可近似认为液体密度是常数即 $\rho = \text{const.}$ 称不可压缩性流体。

气体密度随温度和压强的变化影响都大, 对完全气体它们之间的关系用状态方程表示:

$$p = \rho RT \quad (\text{N/m}^2 \text{ 或 Pa}) \quad (1-5-5)$$

式中 p ——气体绝对压强(N/m² 或 Pa);

T ——气体绝对温度(K);

R ——气体常数(J/kg · K)。

一个标准大气压下 4℃ 的蒸馏水密度为 1000kg/m³。一个标准大气压下 0℃ 的空气密

度为 1.293kg/m^3 。某种流体的密度 ρ_f 与 4°C 蒸馏水密度 ρ_w 之比称为该流体的相对密度或比重 s 。它又是流体质量 M_f 与同体积 4°C 时蒸馏水质量 M_w 之比：

$$s = \frac{\rho_f}{\rho_w} = \frac{M_f}{M_w} \tag{1-5-6}$$

式中 ρ_f, M_f ——分别为流体的密度、同体积的质量；
 ρ_w, M_w ——分别为 4°C 蒸馏水的密度、同体积的质量。

因为比重是流体质量或密度与同体积 4°C 蒸馏水质量或密度之比，故是一个无量纲数。

表 1-7 给出标准大气压下水、原油、空气比重随温度的变化。

表 1-7 标准大气压(101325Pa)下水、原油、空气的比重随温度的变化

温度($^\circ\text{C}$)	0	5	10	15	20	25	30
水	0.9998	1.0000	0.9997	0.9991	0.9982	0.9970	0.9957
原油	0.8693	0.8662	0.8631	0.8600	0.8569	0.8538	0.8507
空气	1.293×10^{-3}	1.273×10^{-3}	1.248×10^{-3}	1.226×10^{-3}	1.205×10^{-3}	1.185×10^{-3}	1.165×10^{-3}
温度($^\circ\text{C}$)	40	50	60	70	80	90	100
水	0.9922	0.9880	0.9832	0.9778	0.9718	0.9653	0.9584
原油	0.8445	0.8383	0.8321	0.8259	0.8196	0.8136	0.8074
空气	1.128×10^{-3}	1.098×10^{-3}	1.060×10^{-3}	1.029×10^{-3}	1.000×10^{-3}	0.973×10^{-3}	0.946×10^{-3}

表 1-8 列出标准大气压下水、常见液体的密度、动力粘度等物理参数随温度的变化数值。

表 1-9 是常见气体在标准大气压(101325Pa) 20°C 时的密度等物理参数的数值。

表 1-9 常见气体在标准大气压(101325Pa) 20°C 时的物理参数

气体	空气	二氧化碳(CO_2)	一氧化碳(CO)	氦(He)	氢(H_2)	沼气(CH_4)	氮(N_2)	氧(O_2)
分子量 $m(\text{g})$	28.96	44.01	28.01	4.003	2.016	16.04	28.01	32.00
气体常数 $R(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	287	188.9	296.5	2007	4124	518.3	296.2	259.8
定压比热 $C_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	1005	814.7	1032	5192	14180	2191	1032	660.0
定容比热 $C_v(\text{J/kg} \cdot \text{K})$	717.2	621.2	734.7	3115	10060	167.2	734.8	471.1
绝热指数 k	1.400	1.304	1.404	1.667	1.410	1.310	1.404	1.401
密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	1.025	1.84	1.16	0.166	0.0839	0.668	1.16	1.33
动力粘度 $\mu(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.18×10^{-4}	0.148×10^{-4}	0.182×10^{-4}	0.197×10^{-4}	0.09×10^{-4}	0.134×10^{-4}	0.176×10^{-4}	0.2×10^{-4}
运动粘度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$	14.9×10^{-6}	8×10^{-6}	15.7×10^{-6}	118×10^{-6}	107×10^{-6}	20×10^{-6}	15.2×10^{-6}	15×10^{-6}

表 1-8 标准大气压(101325Pa)下常见液体的密度粘度等物理参数随温度变化

液体	温度 t (°C)	比重 s	密度 ρ (kg/m ³)	比容 v (m ³ /kg)	压缩系数 β_p (1/bar)	体积模数 K (bar)	动力粘度 μ (Pa·s)	运动粘度 ν (m ² /s)	汽化压强 P_v (Pa 绝对)	表面张力 系数 σ (N/m)
蒸馏水	4	1	1000	1×10^{-3}	0.485×10^{-4}	20600	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}	870	0.075
苯	20	0.895	895	1.12×10^{-3}	0.97×10^{-4}	10300	0.65×10^{-3}	0.73×10^{-6}	10000	0.029
四氯化碳	20	1.588	1588	0.63×10^{-3}	0.91×10^{-4}	11000	0.97×10^{-3}	0.61×10^{-6}	12100	0.027
原油	20	0.856	856	1.17×10^{-3}	—	—	7.2×10^{-3}	8.4×10^{-6}	—	0.08
汽油	20	0.678	678	1.47×10^{-3}	—	—	0.29×10^{-3}	0.43×10^{-6}	55000	—
甘油	20	1.258	1258	0.79×10^{-3}	0.23×10^{-4}	43500	1490×10^{-3}	1184×10^{-6}	0.014	0.063
煤油	20	0.808	808	1.24×10^{-3}	—	—	1.92×10^{-3}	2.4×10^{-6}	3200	0.025
水银	20	13.59	13590	0.074×10^{-3}	0.038×10^{-4}	26200	1.63×10^{-3}	0.12×10^{-6}	0.17	0.51
润滑油	20	0.918	918	1.09×10^{-3}	—	—	440×10^{-3}	479×10^{-6}	—	—
水	20	0.998	998	1.002×10^{-3}	0.46×10^{-4}	21800	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-6}	2340	0.073
海水	20	1.025	1025	0.976×10^{-3}	0.43×10^{-4}	23360	1.03×10^{-3}	1.05×10^{-6}	2300	0.074
酒精	20	0.789	789	1.27×10^{-3}	1.1×10^{-4}	8958	1.19×10^{-3}	1.5×10^{-6}	5900	0.022
辛烷 C ₈ H ₁₈	20	0.702	702	1.42×10^{-3}	1.15×10^{-4}	8666	0.547×10^{-3}	0.78×10^{-6}	14000	0.002
松节油	20	0.862	862	1.16×10^{-3}	0.88×10^{-4}	11370	1.49×10^{-3}	1.73×10^{-6}	5100	0.027
蓖麻油	20	0.960	960	1.04×10^{-3}	0.53×10^{-4}	18760	0.961×10^{-3}	1.00×10^{-6}	—	—
亚麻仁油	20	0.942	942	1.06×10^{-3}	0.57×10^{-4}	17620	0.455×10^{-3}	0.48×10^{-6}	—	—
液氢	-257	0.072	72	13.9×10^{-3}	—	—	0.021×10^{-3}	0.29×10^{-6}	21400	0.025
液氧	-195	1.206	1206	0.83×10^{-3}	—	—	82×10^{-3}	68×10^{-6}	21400	0.015