

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

周 欣 主 编
林 强 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA

TB126/40

2007

GONGCHENG LIUTI LIXUE
工程流体力学

主 编 周 欣
副主编 林 强
编 写 王 娟
主 审 郑叔琛



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”规划教材。

本书主要包括：流体的基本物理性质、流体静力学、流体动力学基础、相似原理及量纲分析、管内不可压缩流体的流动、理想流体的流动、黏性流体动力学基础、气体动力学基础。各章均编选一定数量的例题、思考题及习题，注重培养学生运用基本理论分析和解决实际问题的能力。

本书可作为高等学校本科、高职高专及成人教育热能动力、建筑环境与设备工程等专业的“工程流体力学”课程教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/周欣主编. —北京：中国电力出版社，
2007.9

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-5954-0

I. 工… II. 周… III. 工程力学：流体力学-高等学校-教材 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112405 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 346 千字

印数 0001—3000 册 定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是以热动力类专业的教学需要为主线,同时兼顾其他相近专业的教学需要而编写的,按照认识发展规律,先易后难,从一维到三维、从理想到实际、从不可压缩流体到可压缩流体逐渐深入。在加强理论的基础上,更注重实际应用能力的培养。教材编写力求改革,寻求创新,使教、学、用三者紧密结合。本教材的主要内容包括流体的基本物理性质、流体静力学、流体动力学基础、相似原理及量纲分析、管内不可压缩流体的流动、理想流体的流动、黏性流体动力学基础、气体动力学基础。各章均编选一定数量的例题、思考题及习题,注重加强对学生运用基本理论分析和解决实际问题能力的培养。

本书可作为高等学校本科、高职高专及成人教育热动力、建筑环境与设备工程等专业的“工程流体力学”课程教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书第一章、第五章及第六章由王娟老师编写,第二章、第三章及第八章由周欣老师编写;第四章、第七章由林强老师编写。周欣老师担任全书主编。郑叔琛教授负责审稿,并对文稿提出了许多宝贵意见和建议,对提高本教材的编写质量大有裨益。

由于作者水平所限,再加上时间仓促,书中不当及谬误之处在所难免,恳请专家及读者不吝指正,以便作者及时修正。

编者

2007年4月于南京工程学院

主要符号表

A	面积(m^2)	N	某种物理量
a	加速度(m/s^2), 紊流系数(/)	P	功率(W)
B	宽度(m)	p	压强(单位面积上的压力)(N/m^2)
C_a	柯西数	p_a	大气压强(N/m^2)
CV	控制体体积(m^3)	p_f	压力损失(N/m^2)
CS	控制面面积(m^2)	p_g	表压力(N/m^2)
c_p	压差阻力系数(/), 定压比热 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	p_p	风机压头(N/m^2)
c_v	定容比热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	p_v	饱和蒸汽压(N/m^2), 真空压强(N/m^2)
C_f	摩擦阻力系数	p_0	驻点处压强(N/m^2)
C_D	绕流阻力系数	q_V	体积流量(m^3/s)
C_L	升力系数	q_m	质量流量(kg/s)
c	声速(m/s), 压力波传播速度(m/s)	q	换热量
D	直径(m)	R	气体常数[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], 射流断面半径(m)
d	直径(m)、相对密度	R_h	水力半径(m)
d_e	当量直径(m)	r	半径(m)
F	力(N)	s	熵、射流长度(m)
F_D	绕流阻力(N)	St	斯特罗哈数
F_f	摩擦阻力(N)	T	绝对温度(K)、周期、温度的量纲
F_L	绕流升力(N)	t	时间(s)
f	单位质量力(N/kg), 旋涡脱离频率、 振动频率(1/s)	U, u	流速(m/s)
G	重量(N), 重量流量(N/s)	u	内能
g	重力加速度($=9.807\text{m/s}^2$)	u_∞	来流速度(m/s)
H, h	高度(m)	V	体积(m^3)
h	焓(kJ/kg)	V_p	压力体体积(m^3)
h_0	滞止焓(kJ/kg)	v	比体积; 速度(m/s)
h_f	沿程阻力损失(m)	w	相对速度(m/s)
h_j	局部阻力损失(m)	W_s	机械功
h_w	阻力损失(m)	x	坐标轴(m)
J	水力坡度、旋涡强度	y	坐标轴(m)
K	微压计系数、弹性模量(N/m^2)	z	坐标轴(m), 位置高度(m)
κ	比例系数, 绝热指数	α	夹角($^\circ$)
L, l	管长(m)	β	夹角($^\circ$)
L_e, l_e	入口段长度(m), 当量管长(m)	η	单位质量流体所具有的某种物量
n	转速(r/min)	Γ	环流量(速度环量)(m^2/s)

δ	平板间距(m), 壁面厚度(m), 边界层厚度(m)	Ma	马赫(Mach)数
δ_v	黏性底层厚度(mm)	We	韦伯(Weber)数
ϵ	壁面粗糙度(mm)	下标	
θ	角度($^{\circ}$)	C	形心处
λ	沿程损失系数(/)	0	滞止参数
μ	绝对黏度($N \cdot s/m^2$)	max	最大值
ν	运动黏度(m^2/s)	cr	临界参数
γ	角变形速度	n	法向
π	势函数	τ	切向
ζ	局部损失系数(/)	K	弹性力
ρ	密度(kg/m^3)	I	惯性力
σ	表面张力(N/m)	l	长度
τ	应力(N/m^2)	is	迁移惯性力
τ_0	壁面切应力(N/m^2)	m	平均、模型
φ	势函数	p	压力、原型
ψ	流函数	v	速度
Ω	旋涡量	w	壁面
ω	旋转角速度(1/s)	x	x 轴方向
Eu	欧拉(Euler)数	y	y 轴方向
Fr	弗劳德(Froude)数	z	z 轴方向
Re	雷诺(Reynolds)数	∞	无穷远处

目 录

前言

主要符号表

引言	1
第一章 流体的基本物理性质	4
第一节 流体的定义及特征	4
第二节 流体的“连续介质”假定	4
第三节 流体的密度	5
第四节 流体的压缩性和膨胀性	7
第五节 流体的黏性	10
第六节 液体的表面性质	15
本章小结	17
思考题	17
习题	18
第二章 流体静力学	20
第一节 作用在流体上的力	20
第二节 流体静压强及其特性	20
第三节 流体的平衡微分方程	22
第四节 重力场中流体的平衡	24
第五节 液体的相对平衡	29
第六节 静止液体作用在平面上的总压力	33
第七节 静止液体作用在曲面上的总压力	36
第八节 浮力原理	39
本章小结	41
思考题	43
习题	44
第三章 流体动力学基础	50
第一节 研究流体运动的方法	50
第二节 流动的分类	51
第三节 流体动力学的基本概念	53
第四节 系统与控制体	56
第五节 一维流动的连续性方程	58
第六节 理想流体一维稳定流动伯努利方程	59
第七节 沿流线主法线方向的压强和速度变化	61
第八节 黏性流体总流的伯努利方程	62
第九节 伯努利方程的应用	64
第十节 动量方程与动量矩方程	68

本章小结	72
思考题	74
习题	74
第四章 相似原理及量纲分析	80
第一节 力学相似性原理	80
第二节 力学相似准则	81
第三节 近似模型试验	84
第四节 量纲分析	85
本章小结	89
思考题	90
习题	90
第五章 管内不可压缩流体的流动	92
第一节 黏性流体管内流动的能量损失	92
第二节 黏性流体的两种流动状态	93
第三节 黏性流体圆管中的层流流动	94
第四节 黏性流体圆管中的紊流流动	97
第五节 沿程损失系数	101
第六节 局部损失系数	104
第七节 管道水力计算	107
第八节 水击	115
本章小结	117
思考题	118
习题	119
第六章 理想流体的流动	122
第一节 流体的连续性微分方程	122
第二节 流体微团运动的分析	123
第三节 理想流体的运动微分方程	127
第四节 理想流体有旋流动	130
第五节 速度势函数 流函数 流网	135
第六节 几种简单的不可压缩流体的平面流动	139
第七节 几种平面无旋流动的叠加	142
第八节 流体绕过圆柱体的无环流流动	146
第九节 流体绕过圆柱体的有环流流动	148
第十节 叶栅升力公式	150
第十一节 库塔条件	153
本章小结	154
思考题	157
习题	157
第七章 黏性流体动力学基础	159
第一节 不可压缩黏性流体的运动微分方程	
纳维—斯托克斯方程 (Navier-Stokes equation)	159
第二节 边界层的基本概念	164

第三节	边界层的动量积分关系式	165
第四节	平板层流边界层的近似计算	166
第五节	平板紊流边界层的近似计算	168
第六节	曲面边界层的分离现象	170
第七节	绕过圆柱体的流动 卡门涡街	171
第八节	绕流阻力和升力	172
第九节	自由射流	175
本章小结		177
思考题		178
习题		178
第八章	气体动力学基础	180
第一节	声速 马赫数	180
第二节	完全气体一维绝能定常流动和等熵定常流动	182
第三节	正激波	188
第四节	微弱扰动在气体中的传播	194
第五节	膨胀波	195
第六节	斜激波	196
第七节	变截面管流	203
第八节	在等截面管中有摩擦的绝热流动	210
第九节	在等截面管中有摩擦的等温流动	215
本章小结		216
思考题		217
习题		218
参考文献		220

引 言

自然界中存在着液体、气体和固体,通常把液体和气体统称为流体。流体力学是力学的一个分支,它主要研究流体处于静止状态和运动状态时的规律、流体和与其相接触的固体壁面间相互作用力及其在工程技术领域应用。

流体力学在工程技术中有着广泛的应用。例如:在电力工业中的火电站、核电站、水电站等,工作介质均为流体,而作为带动发电机发电的汽轮机、水轮机、燃气轮机以及输送流体的泵与风机都属于流体机械,这些流体机械的设计必须服从流体流动的规律;在机械行业中润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决都必须依靠流体力学的理论;在造船工业、航空工业、冶金工业、石油工业以及土木建筑中的给水排水、采暖通风等各工业部门中也都有大量的流体力学问题;海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、季风等也都是流体力学问题。此外,血液也是一种特殊的流体,血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动规律,人工心脏、心肺机及助呼吸器的设计都要依赖于流体力学的基本原理。由此可见,流体力学是一门重要的学科。

流体力学的研究可以分为理论分析、实验研究、数值计算三个方面。

理论分析是根据流体运动的普遍规律,如质量守恒、动量守恒和能量守恒等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。但是由于数学分析和计算方法的局限性,许多实际流动问题还难以用理论分析的方法精确求解。

实验研究在流体力学中占有重要地位。实验模型一般是分析影响实际流体力学问题的因素,分清主次,抓住主要因素,根据相似原理建立模型,再根据模型实验所得的数据求出原型的数据。

数学的发展、计算机的不断进步及流体力学各种计算方法的发明,使许多原来无法用理论知识分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能。数值计算方法一般是按照理论分析方法确定数学模型,再在此基础上合理选用计算方法,通过编制计算程序在计算机上计算,最后求得数值解。

流体力学是在人类同自然界的斗争和生产实践中逐渐发展起来的。古时的大禹治水疏通江河,说明我国古代已有大规模的治河工程;秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;另外,我国古代劳动人民还利用定水头下孔口出流的原理发明了刻漏和铜壶滴漏,随后又发明了水磨、水碾等。大约与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统等等。

对流体力学学科的形成作出贡献的第一人是古希腊的阿基米德(Archimedes)。公元前250年,他建立了浮力定律,奠定了流体静力学的基础,其《论浮体》是人类最早的流体力学专著。但是由于奴隶制、神权和宗教观念的束缚,在此后千余年间,流体力学并没有重大发展。

直到15世纪,在意大利著名的物理学家和艺术家列奥纳德·达·芬奇(Leonardo da Vinci)的著作中才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题,促进了这一时期水

力学和流体力学的发展。

17 世纪,帕斯卡(Pascal)阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学,尤其是流体动力学,作为一门严密的学科,却是在经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念,奠定了质量、动量、能量三个守恒定律之后才逐渐形成的。

17 世纪,力学奠基人牛顿(Newton)研究了在流体中运动的物体所受到的阻力,得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他针对黏性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿内摩擦定律。但是,牛顿并没有建立起流体动力学的理论基础,他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。在牛顿之后,又有许多科学家把注意力转向了流体动力学,并且获得了一定的进展:皮托(Pitot)发明了测量流速的皮托管;达朗伯(d'Alembert)对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉(Euler)采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动;伯努利(Bernoulli)从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了实验并加以分析,得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间关系的伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志,开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。从 18 世纪起,位势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都取得了一定的研究成果。其中,拉格朗日(Lagrange)对无旋运动,亥姆霍兹(Helmholtz)对旋涡运动都作了不少研究。在上述的研究中,流体的黏性并不起重要作用,即所考虑的是无黏流体。当然,这种理论还不能阐明流体中黏性的效应。

到了 19 世纪,工程师们为了解决诸多工程问题,尤其是要解决带有黏性影响的流体问题,采取部分地运用流体力学,部分地采用归纳实验结果的半经验公式的方法进行研究,由此形成了水力学。至今,水力学仍与流体力学并行发展。1822 年,纳维(Navier)建立了黏性流体的基本运动方程;1845 年,斯托克斯(Stokes)又以更合理的基础导出了这个方程,并对其所涉及的宏观力学基本概念进行了更为严谨并更让人信服的论证。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是纳维-斯托克斯方程在黏度为零时的特例。雷诺(Reynolds)用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流与紊流的客观存在,并找到了判断层流与紊流的准则数——雷诺数,为流动阻力和损失的研究奠定了基础。

普朗特(Prandtl)学派从 1904 年到 1921 年逐步将纳维-斯托克斯方程作了简化,从推理、数学论证和实验测量等各个角度,建立了边界层理论。该理论能够实际计算简单情形下的边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。

20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。随着航空事业的发展,人们期望能够揭示飞行器周围的压力分布,以及飞行器的受力状况和阻力等问题,这就促进了流体力学在实验和理论分析方面进一步的发展。以儒柯夫斯基(Joukowski)等为代表的科学家,开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼如何受到空气的升力,从而使很重的机体飞上天空。机翼理论的正确性,使人们重新认识了无黏流体的理论,奠定了空气动力学的基础。近年来,我国科学家钱学森在空气动力学方面的新理论、周培元的紊流理论、吴仲华关于翼栅的三元流动理论等,在相关流体力学问题上都作出了杰出

贡献。

机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无黏流体理论同黏性流体的边界层理论很好地结合起来。随着汽轮机的完善和飞机飞行速度提高,又迅速扩展了从 19 世纪就开始的对空气密度变化效应的实验和理论研究,为高速飞行提供了理论指导。20 世纪 40 年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,进而实现了航天飞行。20 世纪 50 年代开始的航天飞行,使人类的活动范围扩展到了其他星球和银河系。

综上所述,流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。

随着科学技术的不断发展,流体力学研究的问题更加深入,与其他学科相互结合,派生出许多分支,形成众多边缘学科,如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、非牛顿流体力学、稀薄气体力学、计算流体力学等等。这些新兴学科的出现和发展,充实了流体力学的研究内容,扩大了研究领域,使流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

第一章 流体的基本物理性质

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门学科,流体的平衡和运动规律不仅与外界因素的影响有关,而且还取决于流体自身的物理性质。本章主要介绍与流体运动密切相关的基本物理性质。

第一节 流体的定义及特征

自然界的物质可分为两大类,即固体和流体。通俗地讲,能够流动的物体称为流体。从力学特征上讲,在任何微小的剪切力作用下都能够发生连续变形的物体称为流体。流体这种连续变形的性质就是流动性。

我们知道,固体可以承受一定的剪切力,静止流体不能承受剪切力。静止流体在承受剪切力时,会产生变形,剪切力不变,变形仍在继续;剪切力停止,变形才会停止。而固体在承受剪切力时,产生一定程度的变形,剪切力不变,变形不再变化。由此可见,流体与固体在承受剪切力时所表现的力学特征是不一样的。流动性是流体最基本的特征。

流体可进一步细分为气体和液体。气体比液体更易变形和流动。在一定条件下,气体和液体的分子大小并无明显差异,但气体的分子间距离要比液体大得多。气体分子间距离大,引力小,分子可以自由运动,极易变形,能够充满所能达到的全部空间。液体的分子间距离小,引力大,分子可作无一定周期和方向的不规则振动,也可在其他分子间移动,但不能像气体分子那样自由移动,因此,液体的流动性不如气体。在一定条件下,一定质量的液体有一定的体积,并取决于容器的形状,但不像气体那样能够充满所能达到的全部空间。

第二节 流体的“连续介质”假定

根据分子物理学说,自然界的一切物质都是由分子构成的,分子间存在着间隙,且永不停息地作不规则的热运动。如:水是由水分子构成的,水分子之间是有间隙的,水分子永不停息地作不规则的热运动。因此,从微观上看流体是不连续的。但是,如果从分子运动论着手来研究流体的运动,显然十分困难,甚至是不可能的。

1755年,瑞士数学家欧拉提出流体的“连续介质”假定:在流体力学的研究中,可以不考虑分子间的间隙,将流体视为由无限多、连续分布的流体质点构成。将流体视为连续的介质似乎与分子学说矛盾,但这种假设是合理的。首先,流体力学并不是研究个别流体分子的微观运动,而是研究众多流体分子的宏观机械运动,描述流体宏观运动状态的物理量,都是众多流体分子运动的平均效果。其次,通常情况下,流体分子间距离很小,一般在工程实际中,流体流动所涉及到的物体特征尺寸比分子间的距离大得多。例如在标准状态(0°C , 101325Pa)下, 1mm^3 空气中包含 2.7×10^{16} 个分子; 1mm^3 水中包含 3.4×10^{23} 个分子,可见流体分子间距离是非常小的。再者,在流体的“连续介质”假定中,认为构成流体的基本单

位是流体质点而不是流体分子。这里所谓的流体质点是包含有足够多流体分子的微团。在宏观上, 流体微团的尺寸与流体流动所涉及到的物体特征尺寸相比足够的小, 小到在数学上可以作为一个点来处理。而在微观上, 流体微团的尺寸与流体分子的平均自由行程相比又足够的大, 大到流体微团以致能够包含有足够多的分子, 使得这些分子的共同物理属性的统计平均值具有意义。因此, 欧拉提出的流体“连续介质”假定是成立的。

后面的章节中, 我们讨论流体中的点都是指流体质点或流体微团。

根据流体的“连续介质”假定, 表征流体宏观运动状态的物理量, 如速度、压强、密度等在空间和时间上都是连续分布的, 是空间和时间的连续函数。这样就可以用连续函数的解析方法来研究流体的平衡和运动规律, 为流体力学的研究提供了很大的方便。

显然, 流体的“连续介质”假定是有适用条件的, 这就是研究所涉及到的物体特征尺寸比分子平均自由行程大得多。在一般工程实际问题中, 把流体视为连续的介质都是正确的, 但是当物体的特征尺寸与分子平均自由行程相比具有同一数量级时 (如在高空稀薄空气中运动的飞行器), “连续介质”假定便不再适用了, 必须借助气体分子运动论来解决有关问题。

第三节 流体的密度

一、流体的密度

物体维持原有运动状态的属性称为惯性。任何物体都有惯性, 流体也不例外。惯性的大小可以通过质量来表征。流体的密度反映流体在空间某点的质量密集程度, 是流体重要的物理属性参数。

如流体中围绕某点的微元体积为 ΔV , 质量为 Δm , 则比值 $\Delta m / \Delta V$ 为该微元体的平均密度。令 $\Delta V \rightarrow 0$, 则 $\Delta m / \Delta V$ 比值的极限为该点的密度, 即

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

$\Delta V \rightarrow 0$ 并不是数学意义上的趋向于一个点, 而是趋向于一个流体质点。

若流体为均质流体, 流体的密度为

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

表 1-1 给出了常见流体的密度。

表 1-1 常见流体的密度

流体名称	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 (kg/m^3)	流体名称	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 (kg/m^3)
水	4	1000	重油	15	900
海水	20	1025	水蒸气	—	0.804
空气	0	1.293	氮气	0	1.251
水银	0	13600	氧气	0	1.429
酒精	15	790	二氧化碳	0	1.976
汽油	15	750	一氧化碳	0	1.250
甘油	0	1260	二氧化硫	0	2.927

根据流体密度的定义可知,对于一定质量的流体,密度的大小与体积有关,而体积又与温度、压强有关。所以,流体的密度是温度、压强的函数。表 1-2 给出了标准大气压下,水、空气和水银的密度随温度变化的数值。

表 1-2 标准大气压不同温度下水、空气、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	958.38
空气	1.29	1.24	1.20	1.12	1.06	0.99	0.94
水银	13600	13570	13550	13500	13450	13400	13350

二、流体的相对密度

流体的相对密度通常指流体的密度与标准大气压、 4°C 时水的密度 (1000kg/m^3) 的比值,即

$$d = \frac{\rho_t}{\rho_w} \quad (1-3)$$

式中 d ——相对密度;

ρ_t ——流体的密度, kg/m^3 ;

ρ_w ——标准大气压、 4°C 时水的密度, kg/m^3 。

三、流体的比体积

单位质量的流体所占有的体积称为比体积或比容,用 v 来表示,单位为 m^3/kg ,即流体密度的倒数。

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

四、混合气体的密度

根据质量守恒定理可知,混合气体的质量等于各组分气体的质量和,即

$$m = m_1 + m_2 + \cdots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i$$

若各组分气体的密度为 $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$, 体积为 $V_1, V_2, \cdots, V_n$; 混合气体的密度为 ρ , 总体积为 V , 则

$$\begin{aligned} \rho V &= \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_n V_n = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \\ \rho &= \rho_1 \frac{V_1}{V} + \rho_2 \frac{V_2}{V} + \cdots + \rho_n \frac{V_n}{V} = \sum_{i=1}^n \rho_i \frac{V_i}{V} \\ \rho &= \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 $\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ ——混合气体中各组分气体所占的体积百分比。

【例 1-1】 某流体密度为 800kg/m^3 , 求其相对密度。

解

$$d = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{800}{1000} = 0.8$$

即相对密度为 0.8。

【例 1-2】 某容器内含有氧气、氮气、二氧化碳的混合气体，其中氧气、氮气、二氧化碳的密度分别为 1.43、1.98、1.25 kg/m³，体积百分比分别为 30%、65%、5%，求混合气体的密度。

解

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \rho_3 \alpha_3 \\ &= 1.43 \times 0.3 + 1.98 \times 0.65 + 1.25 \times 0.05 \\ &= 1.78 (\text{kg/m}^3)\end{aligned}$$

即混合气体的密度为 1.78 kg/m³。

第四节 流体的压缩性和膨胀性

流体在一定的温度下，压强增大，密度变大；在一定的压强下，温度变化，密度也要发生相应的变化。这就是流体的压缩性和膨胀性，所有流体都具有这种属性。

一、流体的压缩性

在一定的温度下，流体的压强增大、密度变大的属性称为流体的压缩性。任何流体都具有压缩性，但不同的流体，压缩性是不同的。如常温常压下，空气比水容易压缩。在一定的温度下，把单位压强变化引起的密度变化率定义为流体的压缩系数，用 β 来表示，即

$$\beta = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

式中 β ——流体的压缩系数，m²/N；

p ——流体的压强，Pa；

ρ ——流体的密度，kg/m³；

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$ ——温度不变的情况下，压强变化引起的密度变化。

若流体压强变化时质量保持不变，则压缩系数还可表示为

$$\beta = \left(- \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \frac{1}{V} \quad (1-7)$$

式中 V ——流体的体积，m³；

$\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$ ——温度不变的情况下，压强变化引起的体积变化。

由于压强增大，体积减小，为了保证压缩系数为正值，在式 (1-7) 的右端冠以负号。

由上述定义式可以看出，在同样的压强增量之下， β 值大的流体密度变化率大，容易压缩； β 值小的流体密度变化率小，不容易压缩。可见，压缩性系数 β 反映了流体的可压缩能力。

工程中往往还涉及压缩性系数的倒数，定义为体积弹性模量，用 K 表示，单位为 Pa，即

$$K = 1/\beta \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表明， K 值大的流体压缩性小， K 值小的流体压缩性大。体积弹性模量 K 反映了流体的抗压缩能力。

流体的压缩系数与流体的种类有关,不同流体的压缩系数不同。同种流体在相同的温度下,所处压强不同,其压缩系数也不同。一般用一定压强变化范围内的平均压缩系数来代替压缩系数,即

$$\beta = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta p} \quad (1-9)$$

若流体压强变化时质量保持不变,平均压缩系数还可表示为

$$\beta = -\frac{\Delta V / V}{\Delta p} \quad (1-10)$$

同种流体在相同压强下,所处温度不同,其压缩系数也是不同的。

流体的压缩系数与流体所处的温度、压强有关,表 1-3 给出了水在不同的温度、压强下的压缩系数。

表 1-3

水的压缩系数 β $\times 10^{-9} \text{ 1/Pa}$

压强 ($\times 10^5 \text{ Pa}$) 温度($^{\circ}\text{C}$)	4.904	9.807	19.614	39.28	78.456
0	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515
5	0.529	0.524	0.518	0.508	0.493
10	0.524	0.518	0.508	0.498	0.481
15	0.518	0.510	0.503	0.488	0.469
20	0.515	0.505	0.495	0.481	0.461

二、流体的膨胀性

在一定的压强下,流体的密度随温度变化的属性称为流体的膨胀性。任何流体都具有膨胀性,但不同的流体,膨胀性是不同的。在一定的压强下,把单位温度变化引起的密度变化率定义为流体的膨胀系数,用 α 表示,即

$$\alpha = \left(-\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \frac{1}{\rho} \quad (1-11)$$

式中 α ——流体的膨胀系数, $1/\text{K}$ 或 $1/^{\circ}\text{C}$;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ ——压强不变的情况下,温度变化引起的密度变化。

由于温度增大,流体的密度一般要减小,为了保证膨胀系数为正值,在式 (1-11) 的右端冠以负号。

若流体温度变化时质量保持不变,则膨胀系数还可表示为

$$\alpha = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \frac{1}{V} \quad (1-12)$$

式中 V ——流体的体积, m^3 ;

$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$ ——压强不变的情况下,温度变化引起的体积变化。