



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

GONGCHENG LIUTI LIXUE

# 工程流体力学

(第三版)

孔珑 主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

*Thermal Energy & Power*



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

TB126

36

2007

GONGCHENG LIUTI LIXUE

# 工程流体力学

(第三版)

主 编 孔 珑

主 审 叶大均



中国电力出版社

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

## 内 容 提 要

本教材共有十章。内容包括：绪论，流体及其物理性质，流体静力学，流体运动学和流体动力学基础，相似原理和量纲分析，管内流动和水力计算，液体出流，气体的一维流动，理想流体的有旋流动和无旋流动，黏性流体绕过物体的流动，气体的二维流动。各章均有一定数量的例题和习题。

本教材为高等学校能源动力类专业及其相近专业流体力学课程的教材，亦可作为有关设计部门和工厂技术人员的参考书。

### 图书在版编目（CIP）数据

工程流体力学 / 孔珑主编. —3 版. —北京：中国电力出版社，  
2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-4870-4

I. 工... II. 孔... 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（2006）第 122716 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>）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1979 年 12 月第一版

2007 年 2 月第三版 2007 年 2 月北京第十七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 454 千字

印数 107371—112370 册 定价 28.00 元

版权专有 翻印必究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

# 序

本教材第一版是根据 1978 年水利电力部组织制订的高等学校电厂热动力专业“流体力学”教材编写大纲编写的,1979 年 12 月出版。使用本教材的院校中,不仅有热动力类专业,还有不少非热动力类专业,在使用过程中对本教材均给予一致好评。该教材于 1987 年获高等学校水利电力类专业优秀教材一等奖,1988 年获全国高等学校优秀教材奖。

本教材第二版是根据 1989 年能源部高等学校热动力类专业教学委员会流体力学及泵与风机教学组第二次扩大会议审定的电厂热动力工程专业“工程流体力学”修订大纲,在本教材第一版的基础上修订而成的,1992 年 11 月出版。这次修订,根据热动力类专业及其相近专业的教学需要和使用该教材十余年来的教学实践,对教材内容和体系都作了一些必要的调整(见第二版序言和教材);教材由原来的七章调整为九章。这样修订的《工程流体力学》,得到许多院校同行们的认可,教材的累计发行量已经超过十万册。这说明,该教材不仅能更好地适应热动力类专业的教学需要,而且也能满足相近专业对教材内容选用的需求,进一步增强了它的教学适用性。

基于上述原因,并根据教育部高等学校非专业类基础力学教学指导分委员会 2004 年制定的“工程流体力学课程教学基本要求”和多年教学实践,本次修订,除将引言的内容适当扩充改为绪论,列为第一章(其他章号顺延)外,对教材内容和体系只作一些必要的删节、增补和调整,不作大的变动;同时对概念、理论的阐述是否准确无误、是否具有逻辑性和条理性,用例命题是否适当合用、是否结合工程实际,文句表述是否确切、简洁通顺,图表是否正确、清晰,图文是否密切配合,以及物理量的名称、符号、单位是否符合法定计量单位——国家标准等,进行审查、修订。

本教材的编写:山东大学孔珑教授编写第一、二、五、六、七、十章,田名振教授编写第三章,蔡国琰教授编写第四章,东北电力学院薛祖绳教授编写第八、九章,孔珑担任主编。清华大学叶大均教授担任主审,他仔细审查了书稿,提出了许多宝贵的意见和建议,使教材的质量得到进一步提高。山东大学的流体力学教师,对教材的修订也提出了宝贵意见。在此一并表示由衷的谢忱。

限于我们的水平,教材中可能会有不足和不妥之处,恳切欢迎读者指正。

编者

2006 年 8 月于山东大学

## 第三版序言

本教材是根据能源部高等学校热能动力类专业教学委员会流体力学及泵与风机教学组第二次扩大会议(1989年)审定的电厂热能动力工程专业《工程流体力学》修订大纲、在原山东工学院、东北电力学院合编《工程流体力学》的基础上修订而成的。

这次修订,根据专业需要和使用该教材十余年来的教学实践,对教材的内容和体系都作了一些必要的调整。在内容方面,与原教材相比,主要的调整有:比较全面系统地阐述了积分形式的基本方程及其应用,适当地充实了相似原理和量纲分析、气体一维流动的内容;其他各章也增添了一些内容,例如毛细压强的导出,正压流体的势函数,拉格朗日法,圆管中紊流沿程损失系数的导出,液体的出流,直接水击和间接水击及气穴和气蚀的概念,理想流体流动的定解条件,边界层的控制,气流折转角的计算等。与此同时,对某些重复的或不需要单独阐述的内容,进行了归并,例如理想流体一维流动的欧拉方程、伯努利方程等;对某些宜在专业课中阐述或偏于专门的内容,进行了删节,例如叶型上的压强分布,管箱的声振计算,绕翼型近声速和超声速流动的定性分析等;考虑到电子计算机的应用已较普遍,所用计算机语言不一,删去了原教材中用ALGOL60语言编制的计算程序,由使用本教材的师生自行处理。在体系方面,将原教材的七章调整为九章;相似原理和量纲分析单独成章,放在基本方程之后和一维流动之前,以加强流体力学实验研究的理论基础,为后面讨论有关流体力学问题的实验研究作好准备;气体的一维流动也单独成章,提前到管流损失和水力计算之后,使工程应用最为广泛的一维流动集中在教材的前面,而在工程应用上更深入一步的二、三维流动集中在教材的最后三章。这样,既符合由浅入深、先易后难的认识发展规律,又可使学生较早接触与专业工程实际密切相关的流体力学问题,也便于不同需要的相近专业选用。其他章节有些内容的位置也作了调整,例如将作用在流体上的力前移到绪论中,将粘性流体总流的伯努利方程前移到基本方程中,将管道入口段中的流动前移到管流损失中,将环形管道中、二平行平板间的层流流动和流体动力润滑后移到纳维-斯托克斯方程之后去讨论等。此外,对于教材中各物理量的名称、单位和符号,也都按《中华人民共和国国家标准 量和单位》和流体力学及泵与风机教学组第二次扩大会议统一的意见进行了订正。

这次修订,孔珑编写引言、第一、四、五、六、九章,田名振编写第二章,蔡国琰编写第三章,薛祖绳编写第七、八章。孔珑担任主编,王文琪担任主审。

这本教材从出版至今已经11年。在此期间,使用过该教材的兄弟院校同行们曾在有关会议上或以书信的形式提出过一些宝贵意见和建议;山东工业大学流体力学教研室曾经组织讲和讨论过教材的重点章节,提出过一些宝贵意见和建议;本教材的主审对修订书稿又提出了许多宝贵意见和建议,这都使书稿的质量得以不断的提高。山东工业大学流体力学教研室的同志和研究生还帮助誊清了书稿。在此一并表示由衷的谢忱。

限于我们的水平,教材中可能会有不足和不妥之处,恳切欢迎读者指正。

编者

1990年11月

## 目 录

序言	
第二版序言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 流体力学的研究内容和研究方法 .....	1
第二节 流体力学在工程技术中的地位 .....	1
第三节 流体力学在教学计划中的地位 .....	2
第四节 工程流体力学内容简介 .....	2
<b>第二章 流体及其物理性质</b> .....	4
第一节 流体的定义和特征 .....	4
第二节 流体作为连续介质的假设 .....	4
第三节 作用在流体上的力 表面力 质量力 .....	5
第四节 流体的密度 .....	6
第五节 流体的压缩性和膨胀性 .....	8
第六节 流体的黏性 .....	10
第七节 液体的表面性质 .....	16
习题 .....	18
<b>第三章 流体静力学</b> .....	20
第一节 流体静压强及其特性 .....	20
第二节 流体平衡方程式 .....	21
第三节 重力场中流体的平衡帕斯卡原理 .....	23
第四节 液柱式测压计 .....	27
第五节 液体的相对平衡 .....	31
第六节 静止液体作用在平面上的总压力 .....	36
第七节 静止液体作用在曲面上的总压力 .....	38
第八节 静止液体作用在潜体和浮体上的浮力阿基米德原理 .....	42
习题 .....	44
<b>第四章 流体运动学和流体动力学基础</b> .....	50
第一节 流体运动的描述方法 .....	50
第二节 流动的分类 .....	52
第三节 迹线 流线 .....	54
第四节 流管 流束 流量 水力半径 .....	55
第五节 系统 控制体 输运公式 .....	56
第六节 连续方程 .....	58
第七节 动量方程 动量矩方程 .....	59
第八节 能量方程 .....	64

第九节	伯努利方程及其应用	65
第十节	沿流线主法线方向压强和速度的变化	69
第十一节	黏性流体总流的伯努利方程	70
	习题	72
<b>第五章</b>	<b>相似原理和量纲分析</b>	<b>77</b>
第一节	流动的力学相似	77
第二节	动力相似准则	79
第三节	流动相似条件	83
第四节	近似的模型试验	84
第五节	量纲分析法	87
	习题	93
<b>第六章</b>	<b>管内流动和水力计算 液体出流</b>	<b>95</b>
第一节	管内流动的能量损失	95
第二节	黏性流体的两种流动状态	96
第三节	管道进口段黏性流体的流动	98
第四节	圆管中流体的层流流动	98
第五节	黏性流体的紊流流动	101
第六节	沿程损失的实验研究	108
第七节	非圆形管道沿程损失的计算	112
第八节	局部损失	113
第九节	各类管流的水力计算	118
第十节	几种常用的技术装置	125
第十一节	液体出流	129
第十二节	水击现象	139
第十三节	气穴和气蚀简介	142
	习题	143
<b>第七章</b>	<b>气体的一维流动</b>	<b>149</b>
第一节	微弱压强波的一维传播 声速 马赫数	149
第二节	气流的特定状态和参考速度 速度系数	151
第三节	正激波	155
第四节	变截面管流	163
第五节	等截面摩擦管流	172
第六节	等截面换热管流	181
	习题	185
<b>第八章</b>	<b>理想流体的有旋流动和无旋流动</b>	<b>188</b>
第一节	微分形式的连续方程	188
第二节	流体微团运动分解	189
第三节	理想流体运动方程 定解条件	192
第四节	理想流体运动 方程的积分	196
第五节	涡线 涡管 涡束 涡通量	197



第六节	速度环量 斯托克斯定理 .....	198
第七节	汤姆孙定理 亥姆霍兹定理 .....	200
第八节	平面涡流 .....	202
第九节	速度势 流函数 流网 .....	204
第十节	几种简单的平面势流 .....	207
第十一节	简单平面势流的叠加 .....	210
第十二节	均匀等速流绕过圆柱体的平面流动 .....	212
第十三节	均匀等速流绕过圆柱体有环流的平面流动 .....	215
第十四节	叶栅的库塔—儒可夫斯基公式 .....	217
第十五节	库塔条件 .....	220
	习题 .....	222
<b>第九章</b>	<b>黏性流体绕过物体的流动 .....</b>	<b>224</b>
第一节	黏性流体微分形式的运动方程(纳维—斯托克斯方程) .....	224
第二节	不可压缩黏性流体的层流流动 .....	230
第三节	边界层的基本概念 .....	238
第四节	层流边界层微分方程 .....	240
第五节	边界层动量积分关系式 .....	241
第六节	边界层的位移厚度和动量损失厚度 .....	242
第七节	平板层流边界层的近似计算 .....	244
第八节	平板紊流边界层的近似计算 .....	245
第九节	平板混合边界层的近似计算 .....	247
第十节	曲面边界层的分离现象 .....	248
第十一节	绕过圆柱体的流动 卡门涡街 .....	250
第十二节	物体阻力 自由沉降速度 .....	253
第十三节	自由淹没射流 .....	257
	习题 .....	260
<b>第十章</b>	<b>气体的二维流动 .....</b>	<b>262</b>
第一节	微弱压强波在空间的传播 马赫锥 .....	262
第二节	微弱压强波 气流折转角 .....	264
第三节	斜激波 .....	269
第四节	激波的反射和相交 .....	273
第五节	激波与边界层的相互干扰 .....	275
	习题 .....	277
<b>附录 A</b>	<b>与流体力学有关的我国法定计量单位 .....</b>	<b>278</b>
<b>附录 B</b>	<b>可压缩流参数表 .....</b>	<b>280</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>289</b>



## 第一章 绪 论

### 第一节 流体力学的研究内容和研究方法

流体力学是力学的一个重要分支。它以流体为研究对象,是研究流体平衡和运动规律的科学。流体力学内容包括流体静力学、流体运动学、流体动力学。流体静力学研究在外力作用下流体平衡的条件及压强分布规律;流体运动学研究在给定条件下流体运动的特征和规律,但不涉及运动发生和变化的原因;流体动力学研究在外力作用下流体的运动规律,以及流体与固体间的相互作用。

流体力学的研究方法,概括起来有三种:

(1) 理论分析方法。进行步骤一般为:分析影响实际流动的各种因素,抓住主要因素,建立流体力学模型;建立描写该模型流动规律的封闭方程组以及与之相应的边界条件和初始条件;解析方程组;将所得答案与实际流动相比较,以确定解的精确度,或进行某些修正。该方法推导严谨,答案精确,但只局限于比较简单的理论模型,对于复杂的流动则无能为力。

(2) 实验研究方法。分析影响实际流动的各种因素,抓住主要因素,根据相似原理设计实验模型;通过实验测定有关相似准则数中的物理量;将实验数据整理成相似准则数,并通过对实验数据的拟合找出准则方程式,以便推广应用于相似的流动。该方法更加接近实际,实验结果可靠;其可靠程度取决于实验模型符合实际的程度以及测量、拟合的精确度。影响实际流动的因素越多,模型实验越难实现;如果只能按主要影响因素设计实验模型,实验结果只是近似的。另外,像大气环流、碳酸岩油田的渗流等无法在实验室内进行实验研究,只能进行观察、实测。

(3) 数值计算方法。按照理论分析方法的第一、二步确定数学模型;合理选用计算方法;编制计算程序,上机计算;分析计算结果,以确定是否符合精确度要求。该方法的优点是,过去许多用解析方法不能求解的问题,在电子计算机上用数值计算可以得到近似解。从一定意义上讲,它是理论分析方法的延伸和拓展。此外,在电子计算机上用数值计算方法还可模拟流体力学实验,并可对多个实验方案进行比较和优选,从而大大节省实验研究的时间和经费。特别对某些无法进行实验或实验耗资巨大的工程领域,数值计算更能显现其突出的优越性。但数值计算方法也有它的局限性,它的数学模型的确立必须以理论分析和实验研究为基础,而且往往难以包括实际流动的所有影响因素。

由上述可知,这三种方法各有利弊,相辅相成。理论指导实验研究和数值计算,使它们进行得富有成效,少出偏差;实验用来检验理论分析和数值计算结果的正确性,提供建立理论模型和研究流动规律的依据;数值计算可以弥补理论分析和实验研究的不足,对复杂的流体力学问题进行既快又省的计算分析。这三种方法的结合应用,必将进一步促进流体力学的快速发展。

### 第二节 流体力学在工程技术中的地位

流体力学在许多工业技术中有着广泛的应用。水利工程的建设、造船工业的发展是同水

静力学的建立和水动力学的发展密切相关的。航空工业中各种飞机和飞行器的设计都要依据空气动力学和气体动力学的基本原理。在电力工业中,不论是水电站、火电站,还是核电站、地热电站,它们的工作介质都是流体,所有动力设备的设计都必须以流体力学基本规律为基础。机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决,都必须应用流体力学的理论。在冶金工业中,也会遇到像气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。化学工业中的流体力学问题则更多,因为大部分化学工艺流程都是伴随有化学反应、传质、传热的流动过程。石油工业中也有大量的流体力学问题,例如油、水、气的渗流问题,油、气的自喷、抽吸和输送问题,以及原油中多种产品的提炼、分离,等等。土木建筑中的给水排水、采暖通风是流体力学问题,海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、环流和季风等都是流体力学问题。人体的循环系统也是流体系统,因此像人工心脏、心肺机、助呼吸器等的设计都要依据流体力学的基本原理。这样看来,流体力学确是许多工业技术部门必须应用和研究的一门重要学科。

### 第三节 流体力学在教学计划中的地位

高等学校能源动力类专业为能源工业与动力工业培养德、智、体全面发展的高级工程技术人才。流体力学是培养他们必备的专业技术基础课程。以热能与动力工程专业中的热电厂为例,它的各种热力设备,诸如风机、水泵、锅炉、汽轮机、凝汽器、冷却塔、烟囱等,它们的工作介质都是流体,如空气、水、汽、油、烟气等;地热电站还要用低沸点的流体丙酮、氯乙烷、氟里昂等;磁流体发电还会遇到热等离子体等。因此,热能与动力工程技术人员只有切实地了解和掌握流体在各种热力设备中的流动规律,才能熟悉和掌握这些设备的性能和运行规律,也才能在电力生产中充分发挥这些设备的效能,更好地为社会主义现代化建设服务。流体力学和热力学、传热学是热能与动力工程专业必修的主要专业技术基础课程。

本教材不可能讲述所有这些流体在各种热能与动力设备中的特殊流动规律,而只能讲述它们基本的共同的流动规律。在学习本课程时,应着重掌握流体力学的基本概念、基本原理、基本计算方法和实验技能。为学好后继课程,为进一步研究流体在热能与动力设备中的特殊流动规律以及特殊流体(如两相流体、等离子体等)的流动,为从事热能与动力工程事业,打下坚实的基础。

### 第四节 工程流体力学内容简介

本教材共分十章。第一章绪论,简述流体力学的研究内容、研究方法,它在工程技术、教学计划中的地位等。第二章流体及其物理性质,主要讨论流体的特征及其连续介质假设,作用在流体上的力,流体的主要物理性质。第三章流体静力学,主要讨论流体静压强及其特性,在外力作用下流体平衡的条件和压强分布规律,液柱式测压计,静止流体作用在物体上总压力的计算等。第四章流体运动学和流体动力学基础,主要讨论流体运动的描述方法,流体运动学的某些基本概念,建立系统、控制体的概念和输运公式,并应用输运公式导出流体力学中十分重要的适用于控制体的积分形式的连续方程、动量方程和动量矩方程、能量方程等。前四章是全书的基础。第五章相似原理和量纲分析,主要讨论流动的力学相似、相似准则和相似条件,模型试验方法以及量纲分析法。它们是流体力学试验研究的理论基础。第六

章管内流动和水力计算 液体出流，主要讨论液体在管道内的流动状态、速度分布、能量损失和各类管流的水力计算，以及液体出流等。第七章气体的一维流动，主要讨论微弱压强波的一维传播，气流的特定状态，正激波，以及一维定常的变截面管流、等截面绝热摩擦管流和等温摩擦管流、等截面换热管流。这两章的内容是能源动力工程中最常遇到的各类管流的计算问题。第八章理想流体的有旋流动和无旋流动，主要讨论理想流体微分形式的基本方程，流体微团运动分解，有旋流动的基本定理，二维势流以及叶栅、叶型绕流的升力计算等。第九章黏性流体绕过物体的流动，主要讨论黏性流体微分形式的运动方程及其应用，边界层的概念、近似计算和分离现象，分析绕流阻力产生的原因、后果以及减阻方法等。第十章气体的二维流动，主要讨论微弱压强波在空间的传播，气体二维定常流动中的微弱压强波与斜激波及其气流参数的计算，激波的反射、相交及其与边界层相互干扰的定性分析。最后三章主要阐述理想流体、黏性流体和可压缩流体的二维流动，但基本方程、基本定理都是按三维流动推导的。这样，便加强了理论基础，为进一步分析和研究工程实际中更复杂的流动问题奠定了必要的基础。

本教材采用我国法定计量单位。国际单位制（SI）是我国法定计量单位的基础。特将与流体力学有关的 SI 单位与公制工程单位的对照和换算关系列于附录 A 表 A-1，SI 词头列于表 A-2，以供需要时查阅。

## 第二章 流体及其物理性质

本章主要讨论流体及其特征,流体的连续介质假设,作用在流体上的力,流体的密度、压缩性和膨胀性、黏性、液体的表面性质,以及它们在工程技术中的应用。

### 第一节 流体的定义和特征

通常说能流动的物质为流体。从力学的特征讲,流体是一种受任何微小剪切力作用都能连续变形的物质。只要这种力继续作用,即使力的大小没有变化,流体仍将继续变形(流动);只有当外力停止作用时,变形才会停止。固体则不同,当受到剪切力作用时,固体仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化。由此可见,流体与固体不同,流体具有容易变形(流动)的特征,这就是流体的流动性。

流体按其集态的不同又可分为液体和气体。气体是比液体更易变形(流动)的物质,因为气体的分子分布比液体要稀疏得多。在相同的外界条件下,气体分子与液体分子相比,大小并无显著差异,但气体所占的体积可以达到相同质量液体体积的约 $10^3$ 倍。可见,气体的分子距很大(与约为 $2.5 \times 10^{-10} \text{m}$ 的分子直径相比),分子间的吸引力是微不足道的。因而,气体的分子除去跟器壁和自身相互碰撞外,可以自由运动,故气体极易变形(流动),而且总是充满它能够达到的全部空间。液体的分子距较小,分子间的吸引力较大,在周围分子的作用下,液体分子能够作没有一定方向和没有固定周期的无规则振动,同时也能够在其他分子间移动,但不能像气体分子那样自由运动,所以,液体的流动性不如气体。此外,一定质量的液体具有一定的体积,并取容器的形状,但不像气体那样能够充满全部空间。当液体和气体接触时便会出现液体和气体间的交界面,这种交界面称为液体的自由表面。

### 第二节 流体作为连续介质的假设

众所周知,任何流体都是由无数分子组成的,分子与分子间有空隙,这就是说,从微观角度看,流体并不是连续分布的物质。但是,流体力学并不研究微观的分子运动,而只研究流体的宏观机械运动。在研究流体的宏观运动中,所取的最小的流体微元是体积为无穷小的流体微团(或称流体质点)。流体微团虽小,但却包含着为数甚多的分子。在工程上, $1 \text{mm}^3$ 是很小的体积,但它在标准状态( $0^\circ\text{C}$ ,  $101325 \text{Pa}$ )下所包含的气体分子的数目约有 $2.7 \times 10^{16}$ 个,而包含的水分子的数目约有 $3.4 \times 10^{19}$ 个。可见,流体分子及其间的空隙都是极其微小的。在研究流体运动时,只要所取的流体微团包含有足够多的分子,使各物理量的统计平均值有意义,就可以不去研究无数分子的瞬时状态(这是分子动力学的研究内容),而只研究描述流体运动的某些宏观属性(例如密度、速度、压强、温度、黏度、热力学能等)。这就是说,可以不去考虑分子间存在的空隙,而把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质,这就是流体的连续介质假设。

既然在流体力学中把流体作为连续介质来处理,那么表征流体属性的密度、速度、压强、温度等物理量一般在空间也应该是连续分布的。因为,如果流体内某点(即该点的流体微团)

的属性发生了变化, 则分子运动所产生的扩散作用或流体微团紊乱运动所进行的质量、动量和热量交换, 必然引起它周围流体的同一属性也发生变化, 而这种变化在空间上和时间内必然是逐渐地连续地进行的。当然, 例外的情况也有, 例如超声速气流中出现激波时, 激波前后的流体参数将发生突变, 这将在可压缩流体的流动中加以讨论。由此可以认为: 除个别情况外, 对于流体的连续流动, 表征流体属性的各种物理量应该是空间和时间的单值连续可微函数, 这样就有可能利用微分方程等数学工具去研究流体的平衡和运动的规律了。

顺便提及, 把流体作为连续介质来处理, 对于大部分工程技术问题都是正确的, 但对于某些特殊问题则是不适用的。例如, 当分子的自由行程和所涉及的最小有效尺寸可以相比拟时(如火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术等), 必须舍弃宏观的连续介质的研究方法, 而代之以微观的分子动力学研究方法。

### 第三节 作用在流体上的力 表面力 质量力

为了研究流体的宏观运动, 可先分析一下作用在处于运动状态的流体上的力。这些力分为两类: 表面力和质量力。

#### 一、表面力

表面力即作用在所取分离体表面上的力。这种力通常指的是分离体以外的流体通过接触面作用在分离体上的力。

如果在流动的流体中任取一体积为  $V$ 、表面积为  $A$  的流体作为分离体  $C$ , 则分离体以外的流体通过接触面必定对分离体以内的流体有作用力。如图 2-1 所示, 在分离体表面的  $b$  点取一微小面积  $\delta A$ , 作用在它上面的表面力为  $\delta \vec{F}$ 。一般情况下,  $\delta \vec{F}$  可以分解为沿法线方向  $\vec{n}$  的法向力  $\delta \vec{F}_n$  和沿切线方向  $\vec{\tau}$  的切向力  $\delta \vec{F}_\tau$ 。以微小面积  $\delta A$  除表面力并取极限, 便可求得作用在  $b$  点单位面积上的表面力:

$$\vec{p}_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}}{\delta A} \quad (2-1)$$

称为应力, 单位为 Pa。通常  $\vec{p}_n$  与  $\vec{n}$  的方向不一致, 它的大小不仅与  $b$  点的位置有关, 而且还与作用面的方位和时间  $t$  有关, 即  $\vec{p}_n = f(x, y, z, \vec{n}, t)$ 。作用在  $b$  点单位面积上的法向力和切向力分别为

$$\vec{p}_{nn} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}_n}{\delta A} = \frac{d\vec{F}_n}{dA} \quad (2-2)$$

$$\vec{p}_{n\tau} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}_\tau}{\delta A} = \frac{d\vec{F}_\tau}{dA} \quad (2-3)$$

分别称为法向应力和切向应力。它们是研究流体流动时经常遇到的两种应力。

如前所述, 在液体与异相物质接触的自由表面上还有表面张力, 它是一种特殊类型的表

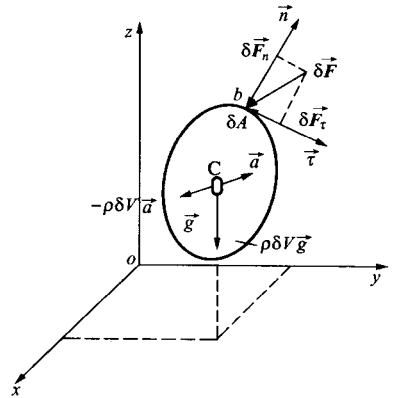


图 2-1 作用在流体上的表面力和质量力

面力, 它不是接触面以外物质的作用结果, 而恰恰是由液体内的分子对处于表面层的分子的吸引而产生的。

## 二、质量力 (体积力)

质量力即某种力场作用在流体的全部质点 (全部体积) 上的力, 是和流体的质量成正比的力, 例如, 重力场中地球对流体全部质点的引力作用所产生的重力, 磁场和电力场对磁性物质和带电物质所产生的磁力和电动力等。如图 2-1 所示, 在分离体 C 内, 取一微小体积  $\delta V$ , 如微小体积的平均密度用  $\rho$  表示, 则重力场作用在它上面的质量力可表示为  $\rho\delta V\vec{g}$ 。对所有其他微小体积均可这样表示。

当应用达朗伯 (J. Le.R. D'Alembert) 原理去研究流体的加速运动时, 虚加在流体质点上的惯性力也属于质量力。这种力, 在直线加速运动中只有沿直线的惯性力; 在一般曲线运动中则有切向惯性力和离心惯性力; 在相对运动中, 当牵连运动为转动时, 还可能有哥氏惯性力。如图 2-1 所示, 若微小体积的平均绝对加速度为  $\vec{a}$  时, 则虚加在微小体积上的惯性力可表示为  $-\rho\delta V\vec{a}$ 。对所有其他微小体积均可这样表示。

如果用  $\vec{f}$  表示作用在单位质量流体上的质量力矢量, 用  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  表示它沿直角坐标轴的分力, 用  $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$  表示直角坐标轴上的单位矢量, 则

$$\vec{f} = f_x\vec{i} + f_y\vec{j} + f_z\vec{k}$$

在研究流体的宏观运动时, 最常遇到的流体属性是流体的压强、密度和黏度。不论是在各种管道的流动计算中, 还是在绕过物体的流动计算中, 它们都是要用到的主要物理量。在研究深水作业、水击现象和高速气流的流动时, 必须考虑流体可压缩的属性, 即流体的压缩性与膨胀性。在液体与气体及液体与固体之间有交界面时 (如液滴的形成, 小股液体射流, 毛细管中的毛细现象), 液体的表面性质必须加以考虑。在气蚀等现象中还会用到饱和蒸汽压强, 在可压缩流体的流动中还会用到热力学能、熵等, 由于这些物理量在热力学中已经作了较详细的讨论, 这里不再赘述。下面将分别讨论以上经常遇到的一些流体属性。

## 第四节 流体的密度

### 一、流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一, 它表征流体在空间某点质量的密集程度。如流体中围绕着某点的体积为  $\delta V$ , 其中流体的质量为  $\delta m$ , 则比值  $\delta m/\delta V$  为体积  $\delta V$  内流体的平均密度。令  $\delta V \rightarrow 0$  而取该比值的极限, 便可得到该点处的流体密度, 即

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2-4)$$

$\rho$  表示流体单位体积内所具有的质量, 单位为  $\text{kg/m}^3$ 。

必须指出, 正如在流体的连续介质假设中所讨论的那样, 这里数学上的  $\delta V \rightarrow 0$ , 从物理上应理解为体积缩小为无穷小的流体微团, 它的体积同被考察的流体体积相比是完全可以忽略不计的; 但它必须包含足够多的分子, 而不失去把流体当作连续介质来处理的基础。以后遇到的类似情况都应该这样去理解。

假如流体是均匀的流体, 显然流体的密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-4a)$$

式中： $m$  为流体的质量，kg； $V$  为流体的体积， $m^3$ 。

表 2-1 列出了在标准大气压下几种常用流体的密度，表 2-2 列出了在标准大气压和不同温度下的水、空气和水银的密度。

表 2-1 常用流体的密度

流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	备注
蒸馏水	4	1000	
海水	15	1020~1030	
普通汽油	15	700~750	
重油	15	880~890	
润滑油	15	890~920	
酒精	15	790~800	
水银	0	13600	
熔化生铁	1200	7000	
空气	0	1.293	
氧	0	1.429	
氮	0	1.251	
氢	0	0.0899	
一氧化碳	0	1.250	
二氧化碳	0	1.976	
二氧化硫	0	2.927	
水蒸气	0	0.804	为便于计算而推算到 0°C

表 2-2 不同温度下的水、空气和水银密度 (kg/m<sup>3</sup>)

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
空气	1.293	1.247	1.205	1.128	1.060	1.000	0.9465
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是指某流体的密度与 4°C 时水的密度的比值，用  $d$  表示，即

$$d = \rho_f / \rho_w \quad (2-5)$$

式中： $\rho_f$  为流体的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\rho_w$  为 4°C 时水的密度，kg/m<sup>3</sup>。

## 三、流体的比体积

流体密度的倒数称为比体积，即单位质量的流体所占有的体积，用  $v$  表示，单位为 m<sup>3</sup>/kg，即

$$v = 1/\rho \quad (2-6)$$

## 四、混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算，计算式如下：

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (2-7)$$

式中： $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  为混合气体中各组分气体的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  为混合气体中各组分气体所占的体积百分数。



【例 2-1】已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为： $\alpha_{\text{CO}_2}=13.6\%$ ， $\alpha_{\text{SO}_2}=0.4\%$ ， $\alpha_{\text{O}_2}=4.2\%$ ， $\alpha_{\text{N}_2}=75.6\%$ ， $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}=6.2\%$ ，试求烟气的密度。

【解】由表 2-1 查得标准状态下的  $\rho_{\text{CO}_2}=1.976\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{\text{SO}_2}=2.927\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{\text{O}_2}=1.429\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{\text{N}_2}=1.251\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=0.804\text{kg/m}^3$ 。将已知数据代入式 (2-7)，得烟气在标准状态下的密度：  
 $\rho=1.976\times 0.136+2.927\times 0.004+1.429\times 0.042+1.251\times 0.756+0.804\times 0.062=1.336\text{ (kg/m}^3\text{)}$

## 第五节 流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增高，体积便缩小；随着温度的升高，体积便膨胀，这是所有流体的共同属性，即流体的压缩性和膨胀性。

### 一、流体的压缩性和膨胀性

流体的压缩性用单位压强所引起的体积变化率表示，称为压缩系数，以  $\kappa$  表示。当温度不变时，压缩系数由下式确定：

$$\kappa = -\frac{\delta V/V}{\delta p} \quad (2-8)$$

式中： $\delta p$  为压强的增量， $\delta V/V$  为流体相应的体积变化率。由于压强增大，体积缩小， $\delta p$  与  $\delta V$  异号，故在等式的右侧加一负号。 $\kappa$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。式 (2-8) 表明，对于同样的压强增量， $\kappa$  值大的流体，其体积变化率大，较易压缩； $\kappa$  值小的流体，其体积变化率小，较难压缩。

压缩系数的倒数为体积模量，用  $K$  表示：

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{\delta p}{\delta V/V} \quad (2-9)$$

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小。显然， $K$  值大的流体的压缩性小， $K$  值小的流体的压缩性大。 $K$  的单位与压强相同，为 Pa。

在一定温度下水的体积模量与压强的关系列于表 2-3。由表中可见，水的  $K$  值很大，即它的压缩性很小。通常在工程计算中近似地取水的  $K=2.0\text{GPa}$ 。

表 2-3

水的体积模量

(GPa)

温 度 (°C)	压 强 (MPa)				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

流体的膨胀性用单位温升所引起的体积变化率表示，称为体胀系数，以  $\alpha_v$  表示。当压强不变时，体胀系数由式 (2-10) 确定：

$$\alpha_v = \frac{\delta V/V}{\delta T} \quad (2-10)$$

式中： $\delta T$  (或  $\delta t$ ) 为温度的增量， $\delta V/V$  为流体相应的体积变化率。由于温度升高，体积膨胀，故  $\delta T$  与  $\delta V$  同号。 $\alpha_v$  的单位为  $1/\text{K}$  或  $1/^\circ\text{C}$ 。流体的体胀系数在工程计算中有时也会用到。在一定压强作用下水的体胀系数与温度的关系列于表 2-4。

表 2-4 水的体胀系数 (1/°C)

压强 (MPa)	温度 (°C)				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.0981	14×10 <sup>-6</sup>	150×10 <sup>-6</sup>	422×10 <sup>-6</sup>	556×10 <sup>-6</sup>	719×10 <sup>-6</sup>
9.807	43×10 <sup>-6</sup>	165×10 <sup>-6</sup>	422×10 <sup>-6</sup>	548×10 <sup>-6</sup>	704×10 <sup>-6</sup>
19.61	72×10 <sup>-6</sup>	183×10 <sup>-6</sup>	426×10 <sup>-6</sup>	539×10 <sup>-6</sup>	
49.03	149×10 <sup>-6</sup>	236×10 <sup>-6</sup>	429×10 <sup>-6</sup>	523×10 <sup>-6</sup>	661×10 <sup>-6</sup>
88.26	229×10 <sup>-6</sup>	289×10 <sup>-6</sup>	437×10 <sup>-6</sup>	514×10 <sup>-6</sup>	621×10 <sup>-6</sup>

由表 2-4 可以看出, 当温度低于 50°C 时, 水的体胀系数  $\alpha_v$  随压强的增加而增大; 当温度高于 50°C 时,  $\alpha_v$  却随压强的增加而减小。

一般情况下, 需要同时考虑压强和温度对气体体积和密度变化的影响。完全气体<sup>①</sup>的状态方程为

$$pv=RT \quad (2-11a)$$

$$p/\rho=RT \quad (2-11b)$$

式中:  $p$  为气体的绝对压强, Pa;  $v$  为气体的比体积, m<sup>3</sup>/kg;  $\rho$  为气体的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $T$  为气体的热力学温度, K;  $R$  为气体常数, J/(kg·K)。常用气体的气体常数等物性参数列于表 2-5。状态方程说明, 气体的比体积与绝对压强成反比, 而与热力学温度成正比。

表 2-5 常用气体的物性参数表 (101325Pa, 20°C)

气 体	千摩质量 $M$ (kg/kmol)	气体常数 $R$ [J/(kg·K)]	比定压 热容 $c_p$ [J/(kg·K)]	比定容 热容 $c_v$ [J/(kg·K)]	比热 比 $\gamma$	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	动力黏度 $\mu$ (Pa·s)	运动黏度 $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
氦 (He)	4.003	2077	5192	3115	1.667	0.1660	0.197×10 <sup>-4</sup>	118.0×10 <sup>-6</sup>
氢 (H <sub>2</sub> )	2.016	4124	14180	10060	1.410	0.0839	0.090×10 <sup>-4</sup>	107.0×10 <sup>-6</sup>
氧 (O <sub>2</sub> )	32.00	259.8	6600	471.1	1.401	1.330	0.200×10 <sup>-4</sup>	15.00×10 <sup>-6</sup>
氮 (N <sub>2</sub> )	28.01	296.8	1032	734.8	1.404	1.160	0.176×10 <sup>-4</sup>	15.20×10 <sup>-6</sup>
空 气	28.96	287.1	1005	717.2	1.400	1.205	0.180×10 <sup>-4</sup>	14.90×10 <sup>-6</sup>
一氧化碳 (CO)	28.01	296.8	1032	734.7	1.404	1.160	0.182×10 <sup>-4</sup>	15.70×10 <sup>-6</sup>
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> )	44.01	188.9	814.7	621.2	1.304	1.840	0.148×10 <sup>-4</sup>	8.000×10 <sup>-6</sup>
沼气 (CH <sub>4</sub> )	16.04	518.3	2191	167.2	1.310	0.668	0.134×10 <sup>-4</sup>	20.00×10 <sup>-6</sup>

【例 2-2】在厚壁圆筒中受到压缩的水, 当压强为 1MPa 时, 其体积为 1000cm<sup>3</sup>, 当压强增至 5MPa 时, 其体积变为 998cm<sup>3</sup>, 求水的体积模量  $K$ 。

【解】将上述实测数据代入式 (2-9), 可得

$$K = -\frac{\delta p}{\delta V/V} = -\frac{5-1}{(998-1000)/1000} = 2000 \text{ (MPa)} = 2 \text{ (GPa)}$$

## 二、可压缩流体和不可压缩流体

由上述可知, 流体的压缩性是流体的基本属性, 任何流体都是可以压缩的, 只是可压缩的程序不同而已。例如, 水的压缩性比较小, 通常每增加 0.1MPa, 其体积变化率不到 1/10000。其他液体的压缩性一般也是比较小的。气体的压缩性比较大。像等温过程中完全气体的体积

① 热力学中的理想气体在这里称为完全气体, 以便与无黏性的理想流体相区分。