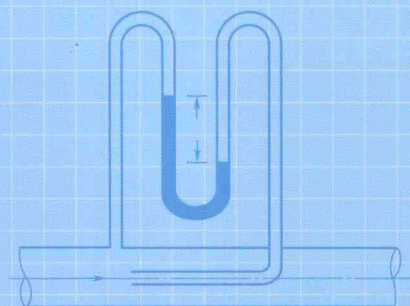
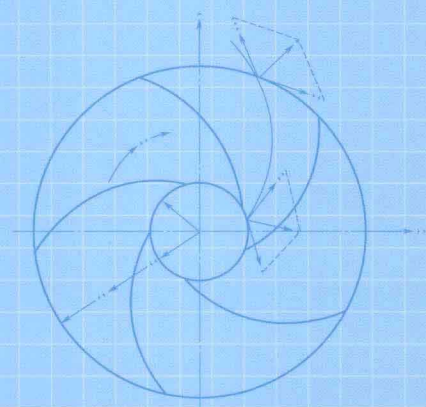
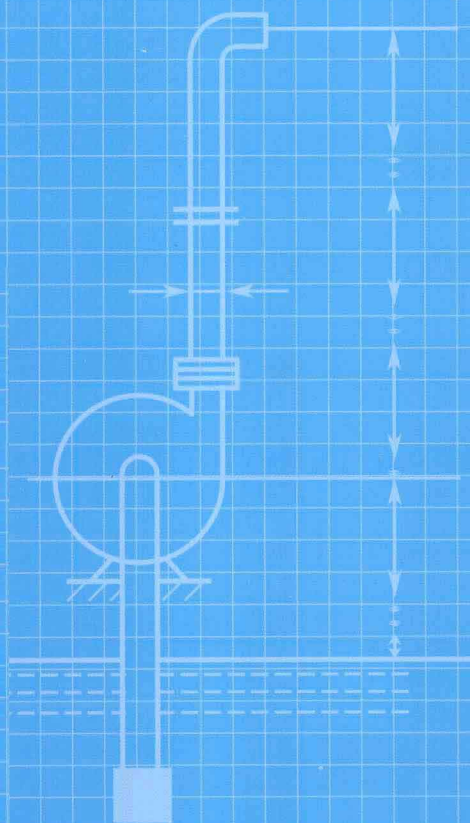


P

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

黄斌维 杨 斌 主编 朱正平 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学

黄斌维 杨 斌 主编
朱正平 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容包括流体的基本物理性质、流体静力学、流体运动学基础、流体动力学基础、相似理论和量纲分析、管路中流动阻力和水头损失、管路的水力计算及分析、孔口出流和缝隙流动、可压缩流体的一元流动、平面流、绕流、两相流等。叙述力求重点突出、深入浅出，通俗易懂。

本书可供油气储运专业、化机等专业的高等院校、高职高专学生使用，也可供从事相关专业的所有工作人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/黄斌维, 杨斌主编. —北京: 化学工业出版社, 2013.11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-18559-4

I. ①工… II. ①黄…②杨… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 232390 号

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 项 澈

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 410 千字 2014 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

工程流体力学是石油工程、石油天然气储运工程、石油机械工程、化工设备维修技术等专业的基礎课。全书主要包括绪论、流体的基本物理性质、流体静力学、流体运动学基础、流体动力学基础、相似理论和量纲分析、管路中流动阻力和水头损失、管路的水力计算及分析、孔口出流和縫隙流动、可压缩流体的一元流动等内容，可为学习专业课和毕业后从事石油开采、储存、运输和管理打下基础。

本教材主要具有以下特色：

① 本教材在编写过程中立足于少学时、宽口径、重技能的教学要求，侧重于应用技术，由浅入深、循序渐进、突出重点，以掌握基本概念、强化应用、扩大知识面为教学重点，以注重能力培养为宗旨，尽量通过典型例题使学生能够对理论知识融会贯通，达到解决工程实际问题的能力。对于基本理论和基本概念的阐述，力求理论正确、概念清晰，同时又注重可读性和实用性。

② 通过教学活动培养学生的工程意识、经济意识和环保意识。

③ 每个单元都配备了思考题和习题，本书结尾又设置了三套模拟试题。通过这些练习引导学生积极思考，培养学生灵活应用理论知识的能力。

④ 本教材以实用为目的，以必需、够用为度，既适合工程应用，又不失与理论衔接。本书是高等院校、高职高专油气储运专业使用教材，也可作为化工设备维修专业或其他相关专业使用教材以及相关工程技术人员的参考用书。

本书第十章为高职选修内容。

本书编写的具体分工为：黄斌维编写第一章、第二章（第三节～第七节）、第三章和第四章；杨斌编写第五章、第八章、第九章、第十章、附录；杨文洁编写第六章、第七章、模拟试题及答案；王进庄编写绪论、第二章（第一节、第二节）。全书统稿工作由黄斌维完成。

全书由黄斌维、杨斌主编，兰州城市学院朱正平教授主审。朱教授对本书的初稿进行了详细的审阅，提出了很多宝贵的修改意见。本书在编写过程中贾如磊、徐晓刚、潘鑫鑫、蒋斌、胡小弟等协助做了许多文字编排、图件绘制等工作。在此，对朱教授及全体审稿人员、相关编者及所有对本书的出版给予支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，本书在内容选择和编写上难免有不妥之处，敬请各位老师和读者批评指正。

编者

2013年10月

目 录

绪 论	1
第一章 流体的基本物理性质	4
第一节 流体的基本概念	4
第二节 流体的物理性质	5
第三节 作用在流体上的力	17
第四节 表面张力和毛细现象	19
思考题	21
习题	22
第二章 流体静力学	24
第一节 流体静压力及其特性	24
第二节 流体平衡微分方程	27
第三节 重力作用下静止流体的平衡方程	31
第四节 流体静压力的表示方法与测量	35
第五节 几种质量力作用下的流体平衡	42
第六节 静止流体对壁面的作用力	47
第七节 物体在液体中的潜浮原理	55
思考题	58
习题	59
第三章 流体运动学基础	63
第一节 流体运动学中的基本概念	63
第二节 研究流体运动的两种方法	70
第三节 连续性方程	74
第四节 流体微团运动的分析	78
思考题	82
习题	83
第四章 流体动力学基础	85
第一节 理想流体运动微分方程式	85
第二节 理想流体沿流线的伯努利方程式	88
第三节 理想流体总流的伯努利方程式	92

第四节	实际流体总流的伯努利方程式	96
第五节	水力坡度与水头线的绘制	98
第六节	相对运动的伯努利方程式	100
第七节	伯努利方程的推广	101
第八节	实际流体总流的伯努利方程的应用	103
第九节	动量方程及其应用	107
思考题		110
习题		110
第五章	相似理论和量纲分析	115
第一节	相似理论	115
第二节	量纲分析及其应用	119
思考题		125
习题		125
第六章	管路中流动阻力和水头损失	127
第一节	管路中流体运动的两种状态及判别标准	127
第二节	管路中流动阻力与水头损失	130
第三节	圆管中的层流流动	132
第四节	圆管紊流运动	136
第五节	非圆形管中的层流流动	144
第六节	局部阻力系数	146
思考题		149
习题		150
第七章	管路的水力计算及分析	152
第一节	管路系统的分类	152
第二节	简单长管水力计算	153
第三节	复杂管路的水力计算	156
第四节	有压管路中的水击	161
第五节	空化与汽蚀的概念	164
思考题		165
习题		165
第八章	孔口出流和缝隙流动	168
第一节	孔口出流的分类	168
第二节	薄壁小孔的稳定自由出流	169
第三节	圆柱外伸管嘴稳定自由出流	173
第四节	各种管嘴的液体出流系数	176

第五节 液体在缝隙中的流动	178
思考题	182
习题	182
第九章 可压缩流体的一元流动	186
第一节 基本概念	186
第二节 可压缩气体一元流动的基本方程式	190
第三节 气流参数	192
第四节 气体在变截面管中的流动	194
思考题	200
习题	200
第十章 平面流 绕流 两相流	202
第一节 旋涡运动	202
第二节 边界层理论基础	210
第三节 两相流简介	219
思考题	225
习题	226
模拟试题	227
模拟试题答案	238
附 录	247
附录一 不同温度下水和空气的密度、重度和黏度	247
附录二 输水管局部阻力计算表	247
附录三 输油管水力计算用表	250
附录四 常用物理单位、工程单位、国际单位对照换算表	252
参考文献	254

绪 论

一、工程流体力学研究的对象和方法

工程流体力学是研究在外力作用下流体的平衡和运动时的基本规律，流体与固体间相互作用的力学特点，用以分析解决工程设计和使用中的实际问题的一门学科。

工程流体力学属于力学的一个分支，其研究内容包括流体静力学、流体运动学和流体动力学三部分。工程流体力学的基本任务在于建立描述流体运动的基本方程，确定流体经过各种通道及绕流不同物体时速度、压力的分布规律，探求能量转换及各种能量损失的计算方法，解决流体与其接触的固体壁面之间的相互作用问题。

工程流体力学的研究对象是流体。流体按压缩性的大小分气体和液体。气体极易压缩，即称为可压缩流体；液体几乎不可压缩，即称为不可压缩流体。按变形特点又把流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体指受力后极易变形，且切应力与变形率成正比的流体；凡不同于牛顿流体的都称为非牛顿流体。根据流体是否具有弹性分为纯黏性流体和黏弹性流体，实际流体都是具有黏性的，若流体同时还具有弹性，则称为黏弹性流体，否则称为纯黏性流体。

在流体力学学科体系中，根据研究对象不同，流体力学可分为液体力学和气体力学两大分支。根据研究方法不同，流体力学可分理论流体力学、工程流体力学和水力学三个分支。理论流体力学主要运用数学方法进行理论研究，力求准确性和严密性。水力学主要运用物理和实验的方法进行实用研究。而工程流体力学则趋向于理论和实用互相结合的研究方法，侧重于解决工程实际中出现的问题，针对工程实际涉及的流体力学问题建立相应的理论基础，而不追求数学上的严密性。当然由于流体运动的复杂性，在一定程度上，这两种方法都需借助于实验研究，得出经验或半经验公式，从而建立流体在平衡及运动时的基本规律。

流体力学的研究方法包括理论方法和实验方法。理论方法就是找出流动问题的主要因素，并提出适当的假设，建立理论模型，再运用数学方法求解流场，揭示流动规律。实验方法就是对所研究的流动问题，选择适当的无量纲参数，建立相应的实验模型，在实验中观察流动现象，测量流体的流动参数并加以分析和处理，然后从中得到流动规律。

二、流体力学的发展简史

流体力学作为一门完整的学科，其发展起来是人类持续不断地与大自然进行斗争的结果。人们最早对流体知识的认识是在治理江河、农田灌溉、供水及航海等实践中开始的。在这些与自然作斗争的实践中，各国人民逐渐积累了大量有关流体运动规律的定性认识，并不断加以总结、提高和应用。古时中国有大禹治水疏通江河的传说。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。隋代大运河工程，至今为人称颂。还有古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。

在西方也和我国类似。公元前 250 年希腊学者阿基米德写的“论浮体”一文，他对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体

平衡理论,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,长期处于封建统治时期,科学停滞不前,流体力学没有重大发展。直到了17世纪,才陆续出现了一些水力原理的基本论著。如托里切利(1643年)提出孔口泄流定律,帕斯卡(1650年)提出压强传递定律,牛顿(1686年)提出液体内摩擦定律等,为简单水力现象提供理论依据。之后,法国皮托发明了测量流速的皮托管;法国达朗贝尔证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系;瑞士的欧拉采用了连续介质的概念,建立了欧拉方程;瑞士的伯努利从经典力学的能量守恒出发,得到了流体稳定流动下的伯努利方程。18世纪英国大规模产业革命,生产力大幅度上升,流体力学也伴随其他学科有了较大进展。欧拉方程、伯努利方程和运动微分方程的建立为流体力学奠定了理论基础。

在19世纪这些理论又得到进一步发展,1822年,法国纳维建立了黏性流体的基本运动方程;1845年,英国斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程,这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程。在纳维、斯托克斯等人的努力下,形成黏性流体力学理论和旋涡理论。德国普朗特学派逐步将纳维-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,能实际计算简单情形下,边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。同时普朗克又提出了许多新概念,并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。同时在实验方面,雷诺、谢才、达西等人发现了两种流态并进行了水力摩阻的研究。

20世纪航空事业的发展,促进了空气动力学研究,儒柯夫斯基、普朗特、卡门等人作出了重大贡献,附面层理论也在此时逐渐形成。非牛顿流体力学也在近二三十年由于各种新工业的需要有了很大的发展。近代流体力学更进一步划出许多分支,如磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学等。随着科学的飞速发展,电子计算机的广泛应用,流体力学的研究领域将不断扩大。

20世纪40年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波又形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后,激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波理论。从20世纪50年代起,电子计算机不断完善,使原来用分析方法难以进行研究的课题,可以用数值计算方法来进行,出现了计算流体力学这一新的分支学科。在20世纪60年代,根据结构力学和固体力学的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法。经过十多年的发展,有限元分析这项新的计算方法又开始在流体力学中应用。

从20世纪60年代起,流体力学开始了流体力学和其他学科的互相交叉渗透,形成新的交叉学科或边缘学科,如物理-化学流体动力学、磁流体力学等;原来基本上只是定性描述的问题,逐步得到定量的研究。

三、工程流体力学的应用

工程流体力学技术基础性很强,应用广泛,几乎渗透到人们的生产和生活的各个领域:供热通风与空调工程的热供应,空气调节,除尘降温等都涉及空气及制冷介质的流动;在建筑领域中,给排水管道,采暖通风管道的设计等都必须使用流体力学的知识;在石油工业中,钻井、油井中油气的采出,地面上油气分离和集输,炼油设备,成品油的加工过程;原油、天然气的储存和运输经常涉及流体力学的许多方面,例如分析流体在管道内流动的规律,确定管道内压力、阻力、流速和流量的关系;管径的设计,管线、储罐强度的校核,管线的布设,泵、风机的大小和类型的选择;泵、风机安装位置的确定,汽蚀、水击现象的预

防, 油品和天然气的计量等; 此外, 航空与航海、冶金、水利、粮食加工、气象等部门, 都涉及流体力学方面的知识。为了解决所有这些问题, 相关专业的学生和科学工作者, 必须具有流体力学的基础知识, 以便在工业建设和管理中更好地发挥作用。

四、本课程基本要求

通过工程流体力学课程的学习, 需要掌握完整的理论基础, 包括: 掌握流体力学的基本概念, 流体力学总流分析方法, 流体运动能量转化和水头损失的规律; 学生应达到对一般流动问题的分析和讨论能力, 包括: 水力荷载的计算, 管道过流能力的计算, 水头损失的分析 and 计算; 掌握测量水位、压强、流速、流量的常规方法等。

第一章

流体的基本物理性质

第一节 流体的基本概念

一、流体的概念

流体是指具有流动性的物质，即能够流动的物质，包括液体和气体，如水和空气。流动性是指在微小剪切力的作用下，流体将产生连续剪切变形的特性。

自然界物质存在的主要形态有固态、液态和气态。其对应的物质分别为固体、液体和气体。固体中的分子排列有序，分子间距小，分子间引力较大，结构致密，因此固体有固定的形状，有一定的体积和刚度。相对于固体来说，流体分子间距较大，分子间引力较小，分子运动剧烈，结构松散，所以流体不能保持一定的形状，且具有很大的流动性。

从力学性质来看，固体具有抵抗拉力、压力和剪切力的能力，所以在一定外力作用下，固体能产生相应的变形来抵抗外力。如果这种变形是弹性变形，在作用力消除后能够恢复原来的形状；如果是塑性变形，在作用力消除后只能部分地恢复原来的形状。而流体则不同，其仅能抵抗压力，不能抵抗拉力，且静止的流体不能抵抗剪切力。当流体受到微小剪切力的作用时，其将产生连续不断的变形即流动。

液体分子间距与其分子直径几乎相等。当液体受到压力时，由于分子间距缩小，分子间斥力增大以抵抗外力。因此液体分子间距很难缩小，具有一定的体积，又由于分子引力作用，液体表面面积有自身收缩到最小的特性，所以液体在上部形成自由分界面。相对于液体来说，气体分子间距很大，吸引力很小，分子间距容易缩小，分子可以自由流动。所以气体既没有固定的形状，也没有一定的体积。

从以上分析可以看出，流体和固体的区别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体既能承受压力，又能承受拉力与剪切力。静止的流体，只能承受压力。流体与固体的最显著区别就是流体具有流动性，没有固定形状。液体和气体的区别在于气体易于压缩，而液体难于压缩；液体有一定的体积，并取决于容器的形状，存在一个自由液面，气体能充满任意形状的容器，无一定的体积，不存在自由液面。液体和气体的共同点是两者均具有流动性（液体的流动性小于气体），即在任何微小剪切力作用下都会发生连续变形，故二者统称为流体。

二、连续介质假设

流体是由大量的分子组成的物质，分子做随机的、杂乱无章的热运动，分子间有空隙。

从微观上来讲, 流体分子分散地、不连续地分布于流体所占有的空间, 但流体力学没有必要研究微观的分子运动, 而只是研究宏观流体在外力作用下所引起的机械运动。因此在流体力学中引入连续介质假设。

连续介质假设是把流体看成无数多的、极小的、可以看成点的流体微团连续不断紧密无际的组成物质。这种可看成点的流体微团称为流体质点, 即认为流体质点是微观上充分大、宏观上充分小的分子微团, 其完全充满所占空间, 没有空隙存在。连续介质假设的物理意义, 就是摆脱了复杂的分子运动, 将一个微观的问题转化为宏观问题来处理, 从而可利用数学分析中连续函数这个有利的工具来解决流体平衡和运动的问题。实践证明, 连续介质假设是合理可行的, 但应当注意其假设仅适用研究问题的特征尺寸必须远远大于质点的特征尺寸的条件。从微观上来说就是流体微团体积必须很小, 且必须包含足够多的分子的条件上连续介质假设才成立。例如, 研究对象是稀薄气体, 这一假设不再适用。

对初学者来讲, 流体质点和流体微团是很容易混淆的两个概念。流体质点从几何上讲, 宏观上看仅是一个点, 无尺度、无表面积、无体积, 从微观上流体质点中又包含很多流体分子。从物理上讲, 具有流体的各物理属性。流体微团虽很微小, 但它有尺度、有表面积、有体积, 可作为一阶、二阶、三阶微量处理。流体微团中包含很多个流体质点, 也包含很多很多个流体分子。由上述定义可知, 流体是大量流体微团的集合, 流体微团又是大量流体质点的集合。

第二节 流体的物理性质

1. 惯性

惯性是指物体反抗外力作用而维持其固有的运动状态的性质, 以质量来量度, 质量越大, 惯性也越大, 运动状态越难改变。根据达朗贝尔原理, 其惯性力的表达式为

$$F_g = -ma \quad (1-1)$$

惯性力是流体做加速运动时, 根据达朗贝尔原理虚加于流体质点上的力, 其大小是质量与加速度的乘积, “-”号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。

2. 流体的密度

单位体积的流体所具有的质量称为密度, 用字母 ρ 来表示。均质流体是指体积内各点密度完全相同的流体, 各点密度不完全相同的流体称为非均质流体。对于均质流体, 其密度为

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

式中 m ——流体的质量, kg;

V ——质量为 m 的流体所占有的体积, m^3 。

对于非均质流体, 在某点的周围取微小的体积 ΔV , 在该体积内流体的质量为 Δm , 则该点的流体密度可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

液体的密度基本上不随压力变化 (极高压力除外), 但随温度略有改变; 气体的密度随温度、压力改变; 低压气体的密度 (极低压力除外) 可按理想气体状态方程计算, 高压气体

的密度可用实际气体的状态方程计算。流体的密度通常可以从相关的工程手册中查取，常见流体的密度见表 1-1。

表 1-1 常见流体的密度

液 体	温度/℃	密度/kg·m ⁻³	液 体	温度/℃	密度/kg·m ⁻³
蒸馏水	4	1000	润滑油	15	900~930
海水	4	1020	重油	15	890~940
重质原油	15	920~930	沥青	15	930~950
中质原油	15	850~900	甘油	0	1260
轻质原油	15	860~880	水银	0	13600
煤油	15	790~820	酒精	15	789
航空煤油	15	780	空气	0	1.29
普通汽油	15	700~750	氧	0	1.429
航空汽油	15	650	一氧化碳	0	1.25
轻柴油	15	830	二氧化碳	0	1.976

(1) 液体的密度

压力对液体的密度影响很小，一般可以忽略，因此常称液体为不可压缩流体，温度对液体密度有一定的影响，对大多数液体来说，温度升高，其密度下降。如纯水的密度在 4℃时为 1000kg/m³，而在 100℃时则为 958.4kg/m³，因此，在检索液体密度数据时，要注明该液体所指的温度。

① 纯液体的密度 ρ 纯液体的密度指单位体积液体所具有的质量。通常可以从物理化学手册或化学工程手册查取。

② 液体混合物的密度 ρ_m 液体混合物的密度通常由实验测定，如比重法、韦氏天平法及波美度比重计法等，前两者用于精密测量，多用于实验室，后者用于快速测量，在工业上广泛使用。

对于液体混合物，当混合前后的体积变化不大时，工程计算中其密度可用下式计算，即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \dots + \frac{x_n}{\rho_n} \tag{1-4}$$

式中 ρ_m ——液体混合物的密度，kg/m³；
 $\rho_1, \rho_2 \dots \rho_n$ ——构成液体混合物中各组分的密度，kg/m³；
 $x_1, x_2 \dots x_n$ ——混合物中各组分的质量分数。

【例 1-1】 已知 20℃ 时水、甘油的密度分别为 998kg/m³，1260kg/m³，求质量分数为 50% 的甘油水溶液的密度。

解：
$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} = \frac{0.5}{998} + \frac{0.5}{1260}$$
得 $\rho_m = 1114\text{kg/m}^3$ 。

(2) 气体的密度

气体是可压缩流体，其密度随压力和温度而变化，因此气体的密度必须标明其状态。从手册中查到的气体密度往往是某一指定条件下的数值，使用时要将查得的密度值换算成操作条件下的密度。

① 纯气体的密度 ρ 在工程计算中，当气体的温度不太低、压力不太高时，气体的密度可按理想气体状态方程式计算，即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——气体在压力 p 、温度 T 时的密度, kg/m^3 ;

p ——气体压力, kPa ;

M ——气体摩尔质量, kg/kmol ;

R ——通用气体常数, $R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

T ——气体温度, K 。

② 气体混合物的密度 ρ_m 气体混合物的密度 ρ_m 的计算式与纯气体的密度计算式类似, 只不过将气体摩尔质量 M 改为气体平均摩尔质量 M_m , 即

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中 $M_1, M_2 \cdots M_n$ ——构成气体混合物的各组分的摩尔质量, kg/kmol ;

$y_1, y_2 \cdots y_n$ ——混合物中各组分的摩尔分数。

(3) 重度

重力特性是指在地球引力作用下流体所受到力的特性, 常用重度来表示。重度是指单位体积内流体所具有的重量, 有时候也称为容重或重率, 以 γ 表示, 单位为 N/m^3 。对于均质流体, 在流体内部各点所受的重力相同, 则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-7)$$

式中 G ——流体的重量, N ;

V ——重量为 G 的流体所占有的体积, m^3 。

对于非均质流体, 任一点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-8)$$

式中 γ ——流体的重度;

ΔG ——微小体积流体的重量;

ΔV ——流体所占有的微小体积。

物体的重力 G 等于质量 m 与重力加速度 g 的乘积, 即

$$G = mg$$

重度与密度的常用关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-9)$$

式中 g ——重力加速度, 随所处的位置高度而变化, 在工程计算中, 一般取 $g=9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

(4) 比体积 (比容)

在工程应用中, 还经常引用到比体积这个概念, 流体的比体积是单位质量流体所占有的体积, 以 v 表示, 即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-10)$$

比体积单位为 m^3/kg 。

(5) 相对密度

液体的相对密度是指液体密度与标准大气压下 4°C 纯水 (4°C 纯水的密度最大, 且为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$) 密度的比值。相对密度是个比值, 是一个无量纲的纯数, 一般用 d 来表示, 即

$$d=\frac{\rho_{\text{流}}}{\rho_{\text{水}}} \tag{1-11}$$

而气体的相对密度是指气体的密度与同样温度和压力下干燥空气密度的比值，在标准大气压下，290K 干燥空气的密度为 $\rho_a=1.2\text{kg/m}^3$ 。

3. 流体的压缩性

流体的压缩性是指在一定温度下，流体的体积随着压力的增大而缩小的性质称为流体的压缩性，受到压缩时体积缩小的程度用体积压缩系数 β 表示，即

$$\beta=-\frac{\Delta V/V}{\Delta p} \tag{1-12}$$

式中 ΔV ——体积变化量， m^3 ；
 V ——原有体积， m^3 ；
 Δp ——压力变化量， Pa ；
 β ——体积压缩系数， Pa^{-1} 。

体积压缩系数的物理意义：在温度不变的条件下，表示压力每增加一个单位，单位流体体积变化量。“-”号表示体积压缩系数为正值，因为压力的变化与体积的变化方向相反，为了使 β 为正值，所以等号右边加一负号。

式(1-12) 表明，在相同压力条件下，体积压缩系数 β 值小的流体，体积变化率小， β 值越小表明流体越难以压缩；而 β 值大的流体，越容易压缩。因此 β 标志着可压缩性的大小。

流体的体积压缩系数的倒数称为体积弹性模量，用 E 来表示，单位为 Pa ，即

$$E=-\frac{1}{\beta}=-\frac{V}{\Delta V}\Delta p \tag{1-13}$$

通常情况下，用体积弹性模量 E 来表示流体可压缩性的大小， E 越大，则表示流体越难以压缩； E 越小，则表示流体越容易压缩，即可压缩性大。

水的体积压缩系数见表 1-2。

表 1-2 水的体积压缩系数					10^{-9}Pa^{-1}
温度/ $^{\circ}\text{C}$	压力/ 10^5Pa				
	4. 90	9. 80	19. 60	39. 20	78. 40
0	0. 541	0. 538	0. 532	0. 524	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. 526	0. 488	0. 469
20	0. 515	0. 505	0. 495	0. 481	0. 461

【例 1-2】 设泵壳内油的容积为 $V=200\text{mL}$ ，从几何尺寸上算得活塞行程所能排挤出的油的体积应为 $\Delta V=31.8\text{mL}$ ，挤压前油的压强为 21MPa ，挤压终了时油的压强为 32MPa ，油的体积弹性模量 $E=2.1\times10^3\text{MPa}$ ，泵的外壳可以认为是刚性的。求泵的容积效率。

解：设泵内油液压强由 21MPa 升到 32MPa 时，油液体积被压缩了 ΔV 。

由体积弹性模量定义式

$$E=-\frac{1}{\beta}=-\frac{V}{\Delta V}\Delta p$$
$$\Delta V=-\frac{V}{E}\Delta p=-\frac{200\times(32-21)}{2.1\times10^3}=-1.0476\text{ (mL)}$$

实际上泵所能排挤出去的油液的体积

$$\Delta V_2 = \Delta V_1 - \Delta V = 31.8 - 1.0476 = 30.75 \text{ (mL)}$$

由泵容积效率的定义得

$$\eta = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \times 100\% = \frac{30.75}{31.8} \times 100\% = 96.7\%$$

4. 流体的膨胀性

和其他物体一样, 流体也具有热膨胀冷收缩的性质。流体的膨胀性是指在压力不变的条件下, 流体体积随温度的升高而增大的性质。膨胀性大小用体积膨胀系数 α 来表示, 单位 K^{-1} 或 $^{\circ}\text{C}^{-1}$, 即

$$\alpha = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} \quad (1-14)$$

式中 ΔV ——体积变化量, m^3 ;

V ——原有体积, m^3 ;

ΔT ——温度的变化量, K 或 $^{\circ}\text{C}$;

α ——体积膨胀系数, K^{-1} 或 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

物理意义: 在一定压力下, 当流体温度升高 1°C 或 1K 时, 单位体积流体的体积相对变化量。水的体积膨胀系数见表 1-3。

表 1-3 水的体积膨胀系数

$^{\circ}\text{C}^{-1}$

压力/ 10^5 Pa	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	0~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	0.14×10^{-4}	1.50×10^{-4}	4.22×10^{-4}	5.56×10^{-4}	7.19×10^{-4}
98	0.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	4.26×10^{-4}	5.48×10^{-4}	7.04×10^{-4}
500	0.149×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.29×10^{-4}	5.23×10^{-4}	6.61×10^{-4}

从式(1-14)、表 1-3 可以看出, 水的体积变化量很小。因此, 在工程应用中, 一般不考虑液体的膨胀性。

5. 可压缩性流体和不可压缩性流体

在一定温度下, 流体的体积随着压力的变化而变化的流体, 称为可压缩性流体, 反之称为不可压缩性流体。对于不可压缩流体, 体积保持不变, 根据式(1-2)得

$$\rho = \text{常数}$$

即不可压缩流体的密度为常数。

从表 1-2 可以看出, 在原有压力的基础上再加上约 20atm ^❶ 的情况下, 才使水的体积改变 1% 左右。在一般工程中, 压力不可能达到这么高, 可见水的压缩性是很小的。工程中常用的其他工作液体, 如液压油、机械油等的体积弹性模量很大, 在一般工程计算中, 往往可以忽略其可压缩性的影响, 所以, 通常将以水为代表的液体当作不可压缩流体来处理。

气体的可压缩性比液体大得多, 在研究气体的时候, 温度和压强对其体积和密度的影响不能忽略。它的体积变化由状态方程来决定, 即

$$pv = RT \quad (1-15)$$

或

$$p = \rho RT$$

❶ $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$ 。

式中 p ——气体的绝对压力, Pa;
 v ——气体的比体积, m^3/kg ;
 R ——气体的状态参数, $\text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;
 T ——热力学温度, K。

任何流体都具有可压缩的基本属性, 但就其压缩率的大小来看, 相差还是比较大的。即使是同一种液体, 可压缩性的考虑与否也不能一概而论。在实际工程计算中, 如果把液体看成为不可压缩流体, 这样能够简化理论分析和计算工作, 并且能够保证足够的精确度。但在某些特殊场合, 如在研究水中爆炸和水击等压力变化较大的现象时, 只有考虑液体的可压缩性才能得出合理的结论。再如, 一般情况下, 液压纯油的体积弹性模量约为 2100MPa , 水的大概取 2200MPa , 可见压缩性很小。但在液压油中混有不溶解的气体时, 则体积弹性模量大幅度下降。

综合以上分析, 研究一个具体流体问题时, 是否考虑压缩性的影响不取决于流体是气体还是液体, 而是由具体条件来定。通常情况下, 把气体看成可压缩流体, 但在流速低 (取小于 50m/s) 的情况下, 也可作为不可压缩流体来处理。例如, 在 1atm 下, 当空气的流速为 68m/s 时, 压缩性带来的相对误差很小, 约为 1% , 这样的近似误差在工程上是允许的。

6. 流体的黏性

黏性是流体具有的一个重要性质, 凡是实际流体都具有黏性。从日常生活中可以发现, 油和水同属于液体, 在状态上没有什么区别。但不难发现油比水流的更慢一些; 用热水清洗油碗比冷水更易洗干净; 在常温下, 沥青是固态, 随着温度的升高, 状态发生改变, 由固态变为液态, 并且随着温度的升高流动性增强; 在原油卸车时, 为了增加原油的流动性, 在槽车上设置加热装置; 在管道输送流体时, 为了增加流体的流动性而设置伴热管, 甚至设置热力泵。这些现象说明, 流体在运动中反映出一种性质, 其对流体的运动起阻碍作用, 并且这一性质与流体的种类有关, 还与温度有关。这种性质就是流体的黏性。

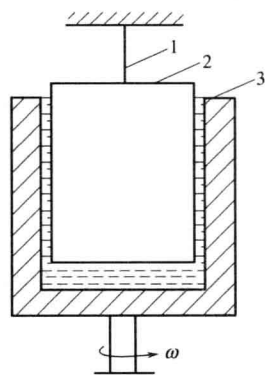


图 1-1 同轴圆筒测量装置
 1—细带; 2—内筒; 3—外筒

(1) 黏性内摩擦力产生的圆筒实验

如图 1-1 所示, 在固定细带下端悬挂一个内圆筒, 其外面放置一个能绕铅直轴旋转的外圆筒容器。在内、外圆筒体的小缝隙间充以某种液体 (水或油)。当外筒开始旋转时, 可以发现内圆筒随之产生同方向的扭转。当外筒转速达到定值 ω 时, 内圆筒将平衡在一定的扭转角度上, 一旦外筒停止转动, 内圆筒也将随之恢复到原来的位置。这个实验说明了在附着于内筒和旋转外筒上的流体之间, 存在着一种阻碍对方运动趋势的内摩擦力。

(2) 黏性的概念及内摩擦力产生的原因

如图 1-2 所示, A 、 B 为宽度和长度都足够大的平行平板, 间距为 y , 两平板间充满着某种液体。下板 A 固定不动 ($v=0$), 上板 B 在拉力 F 的作用下以速度 v_0 向右运动, 由于液体与板之间存在着附着力, 因此黏附在动板下面的流体以速度 v_0 随上板一同向右运动, 越往下速度越小, 直到附着在定板 A 上的流体层速度为零。

AB 两板间的流体做平行于平板的流动, 可以看成是许许多多无限薄层的流体做平行运动。实验表明, 当流体处于运动状态时, 在相邻流体层之间发生相对运动, 上层运动较快的