

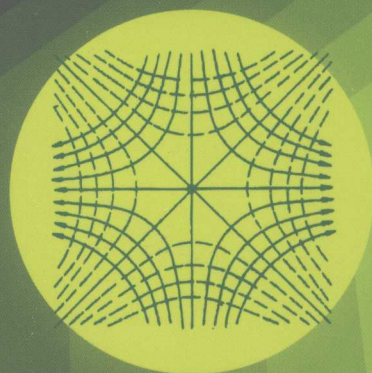
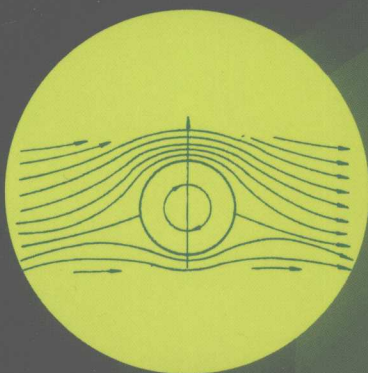
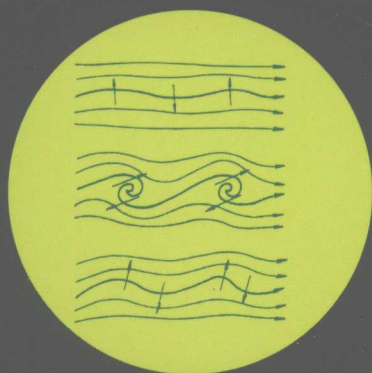


高等院校**建筑环境与设备工程专业**

规划教材 >>>>

LIUTI LIXUE **流体力学**

徐正坦 主编 马金花 副主编



化学工业出版社



高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

流体力学

徐正坦 主编 马金花 副主编



化学工业出版社

北京

本书是根据高等学校土建专业流体力学课程教学基本要求,并考虑目前加强理论基础、拓宽基础知识面、强调工程应用型特色,按大类培养的教改思想编写的,体现了流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。全书共分十三章,内容包括绪论、流体静力学、流体动力学理论基础、流动阻力与水头损失、量纲分析与相似理论、理想和黏性流体动力学、管路计算的基本理论、可压缩气体的一元恒定流动、明渠流动等内容。各章均有一定数量的思考题和习题,书末附有答案。

本书由浅入深,通俗易懂,便于自学,注重基础理论,加强能力的培养。本书可作为高等学校土建类建筑环境与设备工程、给水排水工程、土木工程、市政工程等有关专业本科生的教学用书或教学指导书。也可供研究生,设计单位的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/徐正坦主编. —北京:化学工业出版社,
2009.1

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材
ISBN 978-7-122-04189-0

I. 流… II. 徐… III. 流体力学-高等学校-教材
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 002444 号

责任编辑:陶艳玲

文字编辑:林 丹

责任校对:李 林

装帧设计:尹琳琳

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:北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 426 千字 2009 年 3 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:29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书以本科“建筑环境与设备工程”专业培养目标和培养方案以及主干课程教学基本要求为主要依据,注重教材的科学性、实用性、通用性,在体现教材工程应用型特色的同时,尽量满足了同类工科院校各专业教学的需求。

本书是论述流体力学的专业教材。在编写上着重于流体力学基本理论、基本计算及基本实验技能方法,行文力求简洁清楚,突出重点,分散难点,尽量不将一些理论色彩过浓的非核心内容编入本书,循序渐进,便于自学。增加例题、思考题、习题数量以加强基本解题训练,使各专业学生在学习过程中,尽快掌握典型流体力学的原理和解题方法。本书也包括了一些专业特殊要求的内容,理论和专业内容结合,构成了一个有机整体,有利于增强学生对后续课程学习的适应能力,力求将流体力学专业知识与有关工程问题紧密结合,为从事专业技术工作打下坚实的基础。

由于各院校的学时数不同,专业要求也有差异,因此任课教师可根据具体情况,对某些章节进行取舍。

全书由福建工程学院徐正坦主编。参加编写工作的有徐正坦(第一~四、八、九章)、平顶山工学院尹玉先(第五、六章)、河北科技大学马坤茹、崔明辉(第七、十章)、山东建筑大学马金花(第十一~十三章)。全书由徐正坦统稿。张增凤教授对全书精心进行了审阅,并提出宝贵的修改意见,在此深表谢意。

本书可作为建筑环境与设备工程、环境工程、给排水工程、土木工程、交通工程等专业教学用书,也可供研究生以及设计单位的科技人员参考。

由于作者知识和水平有限,书中若有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年10月

目 录

第一章 绪论	1	第七节 作用于曲面的液体压力	30
第一节 流体力学的任务与研究对象	1	一、总压力的大小、方向及作用点	30
第二节 作用于流体上的力	1	二、压力体的概念	31
一、质量力	1	三、潜体与浮体的平衡	34
二、表面力	2	思考题	35
第三节 流体的主要物理性质	3	习题	36
一、流体的惯性	3	第三章 一元流体动力学理论基础	41
二、流体的压缩性和膨胀性	4	第一节 描述流体运动的两种方法	41
三、流体的黏性	6	一、拉格朗日法	41
四、牛顿流体和非牛顿流体	8	二、欧拉法	42
五、实际流体与理想流体	8	第二节 流体运动的若干基本概念	43
六、液体的表面张力和毛细现象	9	一、恒定流动与非恒定流动	43
第四节 连续介质模型	10	二、一维流动、二维流动、三维流动	44
第五节 流体力学的研究方法	10	三、迹线与流线	44
思考题	11	四、流管、元流、总流、过流断面	46
习题	11	五、流量、断面平均流速	46
第二章 流体静力学	13	六、均匀流与非均匀流	47
第一节 流体静压强及其特性	13	七、渐变流和急变流	47
一、流体静压强的基本概念	13	八、有压流、无压流、射流	48
二、流体静压强的特性	13	第三节 连续性方程	48
第二节 流体平衡微分方程	15	第四节 理想流体的运动微分方程及其	
一、等压面	16	积分	50
二、气体压强	17	第五节 恒定流伯努利方程	52
第三节 重力作用下流体静压强的分布		一、理想流体元流的伯努利方程	52
规律	17	二、实际流体恒定元流的伯努利方程	52
一、重力作用下不可压缩流体中的		三、恒定总流的伯努利方程	53
压强	17	四、伯努利方程中各项的几何意义和物理	
二、绝对压强、相对压强、真空值	18	意义	56
三、压强的三种度量单位	19	第六节 伯努利方程的应用	57
第四节 流体压强的量测	20	一、应用总流能量方程时必须满足的	
一、测压管	20	条件	57
二、U形管测压计	20	二、应用总流伯努利方程时的注意要点	57
三、压差计	21	三、伯努利方程应用的补充说明	59
四、微压计	22	四、空泡和空蚀现象	60
第五节 流体的相对平衡	22	第七节 气流能量方程	60
第六节 作用于平面的液体压力	25	第八节 动量方程	63
一、解析法	25	一、恒定不可压缩总流的动量方程	63
二、图解法	27	二、总流动量方程的应用条件和注意事项	64

三、恒定不可压缩总流量方程应用	
举例	65
第九节 动量矩方程	67
思考题	68
习题	68
第四章 流动阻力与能量损失	73
第一节 流动阻力与能量损失概述	73
一、沿程阻力与沿程损失	73
二、局部阻力与局部损失	73
三、能量损失	74
第二节 实际流动的两种流态	74
一、雷诺实验	74
二、流态的判别准则——临界雷诺数	75
三、流态分析	76
第三节 圆管层流流动	78
一、均匀流动方程式	78
二、沿程阻力系数的计算	79
第四节 紊流流动沿程损失分析	80
一、紊流运动的特征	80
二、尼古拉兹实验	81
第五节 紊流沿程阻力系数的计算	84
一、工业常用管道的当量粗糙度	84
二、沿程阻力系数的计算公式	84
第六节 非圆管的沿程损失	87
第七节 局部水头损失	90
一、局部损失的一般分析	90
二、变管径的局部损失	91
三、管路配件	92
四、明渠	93
五、局部阻力之间的相互干扰	93
思考题	93
习题	94
第五章 孔口、管嘴出流和有压管流	98
第一节 薄壁孔口的恒定出流	98
一、孔口的分类	98
二、薄壁小孔口的恒定自由出流	98
三、薄壁小孔口的恒定淹没出流	99
四、孔口的流量系数	100
五、薄壁大孔口恒定出流	102
第二节 管嘴的恒定出流	103
一、圆柱形外管嘴的恒定出流	103
二、其他形式	105
第三节 孔口、管嘴的非恒定出流	106
第四节 简单管道的水力计算	107
一、短管的水力计算	107
二、长管的水力计算	110
第五节 复杂管道的水力计算	115
一、串联管道	115
二、并联管道	116
三、沿程均匀泄流管道	117
第六节 管网水力计算基础	118
一、枝状管网	118
二、环状管网	119
第七节 离心式水泵及其水力计算	123
一、离心式水泵工作原理	123
二、离心泵性能参数	123
三、水力计算	124
第八节 有压管道中的水击	126
一、水击现象	126
二、水击压强计算	128
三、水击波的传播速度	129
四、停泵水击	129
五、防止水击危害的措施	130
思考题	130
习题	130
第六章 量纲分析与相似原理	135
第一节 量纲及量纲和谐原理	135
一、量纲	135
二、基本量纲和导出量纲	135
三、无量纲量	136
四、量纲和谐原理	136
第二节 量纲分析法	137
一、瑞利法	137
二、 π 定理	138
三、量纲分析方法的讨论	140
第三节 相似理论基础	141
一、相似概念	141
二、相似准则	142
第四节 模型实验	144
一、模型律的选择	144
二、模型设计	145
思考题	147
习题	147
第七章 气体射流	149
第一节 淹没紊流射流的结构特征	149
一、紊流射流的分区	149
二、紊流淹没射流的基本特征	150
第二节 圆断面射流	153
一、主体段的速度和流量沿 x 方向的变化规律	154

二、起始段的速度和流量沿 x 方向的变化规律	155	第五节 绕流运动与附面层概述	194
第三节 平面射流	158	一、附面层的形成及其相关性质	194
第四节 温差(浓差)射流	159	二、管流附面层	195
一、轴心温差 ΔT_m	160	三、绕流阻力	196
二、主体段质量平均温差 ΔT_2	160	思考题	196
三、起始段质量平均温差 ΔT_2	161	习题	196
四、射流弯曲	161	第十章 一元气体动力学基础	198
第五节 有限空间射流	164	第一节 音速、马赫数	198
一、几何特征	164	一、音速	198
二、动力特征	165	二、马赫数	200
三、半经验公式	165	第二节 气体一元恒定流动的连续性方程	201
四、端涡流区	166	一、连续性方程	201
思考题	166	二、运动方程	201
习题	167	三、能量方程	201
第八章 流体动力学理论基础	168	第三节 滞止参数	204
第一节 流体微团运动分析	168	第四节 可压缩气体在管道中的恒定流动	204
一、亥姆霍兹速度分解定理	168	一、气流速度与断面的关系	204
二、流体微团变形的几何解释	169	二、气流按不可压缩流体处理的限度	205
第二节 有旋流动	171	第五节 等温管路中的流动	207
一、涡量、涡量场	172	一、气体管路运动微分方程	207
二、涡线	172	二、管中等温流动	208
三、涡管	172	三、等温管流的特征	209
四、涡通量	173	第六节 绝热管路中的流动	211
五、速度环量、斯托克斯定理	173	一、绝热管路运动方程	211
第三节 不可压缩流体连续性微分方程	173	二、绝热管流的特性	212
第四节 黏性流体的表面应力	175	思考题	212
第五节 应力与变形速度的关系	176	习题	213
第六节 纳维-斯托克斯方程	177	第十一章 明渠恒定流动	214
第七节 理想流体运动微分方程	179	第一节 明渠的分类	214
思考题	180	第二节 明渠均匀流	215
习题	180	一、明渠均匀流的水力特征	215
第九章 绕流运动	182	二、明渠均匀流的形成条件	215
第一节 无旋流动	182	三、明渠均匀流的基本计算	215
第二节 平面势流理论	184	四、明渠水力最优断面	216
第三节 几种简单的平面无旋流动	188	五、允许流速	217
一、均匀直线流动	188	六、明渠均匀流的水力计算问题	218
二、源流和汇流	189	第三节 无压圆管均匀流	220
三、环流	189	一、无压圆管均匀流的水力特征及水力要素	220
四、直角内的流动	190	二、无压圆管均匀流的水力计算问题	221
第四节 势流叠加原理	191	第四节 明渠恒定非均匀流动的基本概念	221
一、均匀直线流中的源流	191	一、断面单位能量	222
二、匀速直线流中的等强源汇流	192		
三、偶极流绕柱体的流动	193		
四、源环流	193		

二、临界水深	223
三、临界底坡	223
四、明渠流动的三种状态	224
第五节 跌水与水跃	226
一、跌水	226
二、水跃	227
第六节 棱柱形渠道中渐变流水面曲线分析	229
一、棱柱形渠道渐变流基本微分方程	230
二、棱柱形渠道渐变流水面曲线的类型和规律	231
三、水面曲线分析的一般原则	234
第七节 棱柱形渠道中渐变流水面曲线计算	235
一、计算公式与方法	235
二、数值积分法	236
三、分段求和法	236
思考题	237
习题	237
第十二章 堰流	239
第一节 堰流的定义及分类	239
一、堰流的定义	239
二、堰流类型	239
三、堰流基本公式	240
第二节 薄壁堰流	241
一、矩形薄壁堰	241

二、三角堰	241
第三节 实用堰流	242
第四节 宽顶堰流	243
一、自由式无侧收缩宽顶堰	243
二、无侧收缩淹没式宽顶堰	244
三、侧收缩宽顶堰流	244
思考题	245
习题	245
第十三章 渗流	247
第一节 渗流基本定律	247
一、渗流模型	247
二、渗流基本定律	247
第二节 集水廊道和井	249
一、集水廊道	249
二、潜水井(无压井)	249
三、承压井(自流井)	250
第三节 井群	251
一、完全潜水井井群的水力计算	251
二、完全承压井井群的水力计算	253
思考题	253
习题	254
附录 本书常用的国际单位与工程单位对照表	256
习题答案	257
参考文献	260

第一章 绪 论

第一节 流体力学的任务与研究对象

流体力学的任务是研究流体平衡和运动时的力学规律及其在工程技术中的应用。流体力学是一门宏观力学，是力学的一个重要分支。

流体力学的研究对象是流体。流体包括液体和气体这两大类。它们的共性是由于流体质点之间的内聚力很小，所以具有很大的流动性，流体的易流动性是流体的最基本特征。流动性是指无论在多小的剪切力作用下，流体都很容易发生连续剪切变形，直至剪切力停止作用为止。但是液体和气体也具有各自的个性：液体有一定的体积而无一定的形状，不易压缩，形状随容器形状而变，可有自由表面；气体则既无一定的体积又无一定的形状，容易压缩，气体将充满整个容器，没有自由表面存在。当在研究某个问题过程中，如果液体或气体其各自的个性可以忽略的话，那么这两者之间便具有相同的规律。流体作为物质的一种基本形态，必须遵循自然界一切物质运动的普遍规律，如牛顿的第二定律、质量守恒定律、能量守恒定律和动量定律等。所以，流体力学中的基本定理实质上都是这些普遍规律的具体体现和应用。

流体力学学科的渗透性很强，几乎与所有基础和技术学科间都有交叉学科形成。如航海、水利水电、热能制冷、土建环保、气液输送、冶金采矿等部门，都会碰到大量与流体运动规律有关的生产技术问题，要解决这些问题就必须具备一定的流体力学知识。因此，流体力学是高等工科院校不少专业的一门重要技术基础课。

学习流体力学时，要注意基本理论、基本概念、基本方法的理解和掌握，要学会理论联系实际地分析和解决工程中的各种流体力学问题。

本书主要采用国际单位制，基本单位是：长度用“米”，代号为 m ；时间用“秒”，代号为 s ；质量用“千克”，代号为 kg ；力是导出单位，采用“牛顿”，代号为 N ， $1N=1kg \cdot m/s^2$ 。在某些专业设备上，仍有采用工程单位制的习惯。使用时，必须注意两种单位的换算。国际单位制与工程单位制基本换算关系是 $1kgf=9.807N$ 。

第二节 作用于流体上的力

流体运动状态发生变化的外因是流体受到力的作用，因此首先必须分析作用在流体上的力。作用在流体上的力，按其物理性质来看，有重力、压力、弹性力、黏性力、惯性力、弹性力等。但在流体力学中分析流体运动时，主要是从流体中取出一封闭表面所包围的流体，作为分离体来分析。因此，流体中作用力按作用方式可以分为质量力和表面力两大类。

一、质量力

质量力是作用于每一流体质点（或微团）上的力。质量力是分布力，它分布于各流体质点的体积上。在均匀流体中，质量力与其作用流体的体积成正比。最常见的质量力包括重力

和惯性力两种。

在流体力学中,质量力的大小通常以单位质量力 $\vec{f}$ 来表示。单位质量力 $\vec{f}$ 在直角坐标系三个坐标方向上的投影可分别以 X, Y, Z 表示。

由于流体处于地球的重力场中(图 1-1),受到地心的引力作用,因此流体的全部质点都受有重力, $G=mg$ 。流体所受的质量力只有重力是流体力学中碰到的普遍情况。当采用直角坐标系时, z 轴铅直向上为正,单位质量力的轴向分量为 $X=0, Y=0, Z=-g$ 。

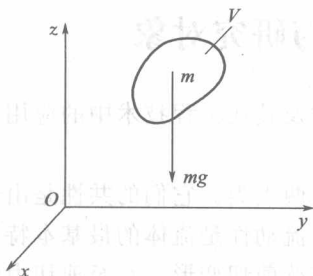


图 1-1 流体的质量力

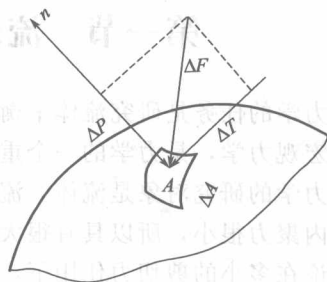


图 1-2 流体的表面力

当研究流体的相对平衡时,如盛装液体的容器作直线运动或旋转运动等,运用达朗伯原理使动力学问题变为静力学问题,虚加在流体质点上的惯性力也看成是作用在流体上的质量力。惯性力的大小等于质量与加速度的乘积,其方向与加速度方向相反。

在国际单位制中,质量力的单位是 N 。单位质量力的单位是 m^2/s ,量纲为 LT^{-2} ,与加速度的单位相同。

二、表面力

表面力是作用在所考虑的流体表面上的力,且与作用流体的表面积大小成正比的力。它是相邻流体之间或固体壁面与流体之间相互作用的结果。这个力的施力体主要取决于流体与流体接触还是与物体接触,前者施力体是流体,后者施力体是物体。在连续介质中,表面力不是一个集中力,而是沿流体表面连续分布的。因此,在流体力学中用单位面积上作用的表面力(称为应力)来表示,应力分为法向应力和切向应力。

如图 1-2,在流体的表面上任取一微小面积 ΔA ,且设作用在该表面上的表面力 ΔF 的方向是倾斜的,然后把此力分解为法向投影 ΔP 以及切向投影 ΔT 。因为流体内部不能承受拉力,所以表面力没有外法线方向的拉力。因此将表面应力分解为

$$\left. \begin{aligned} \bar{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \bar{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$\bar{p}$ 称为面积 ΔA 上的法向应力(平均压强), $\bar{\tau}$ 称为面积 ΔA 上的切应力。当令面积 ΔA 无限缩小至中心点 $A(x, y, z)$,即 $\Delta A \rightarrow A$ 时,则

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

A 点的压强 p 和切应力 τ 的单位都是 N/m^2 。国际单位制中,以 Pa 表示, $1Pa=1N/m^2$;工程单位制为 kgf/m^2 或 kgf/cm^2 。

综上所述，单位质量力 $\vec{f}$ 是空间坐标 (x,y,z) 和时间 t 的函数，可表示为 $\vec{f}=\vec{f}(x,y,z,t)$ ，是质量力在空间中的分布密度；而式(1-1)中的压强 p 和切应力 τ 与空间位置、时间以及作用面的方位都有关，因此被称为是作用面上的分布密度。

第三节 流体的主要物理性质

在研究流体的平衡及运动时，必须知道流体的力学性质。流体运动的基本规律，除了与外部因素有关外，更重要的还取决于流体内在的物理性质，同流体运动有关的主要物理性质有流体的惯性、压缩性、黏性、表面张力等。

一、流体的惯性

惯性是物体维持原有运动状态能力的性质。要改变物体的运动状态，则必须克服惯性的作用。一般用物体的质量来表征物体惯性的量度。在地球引力场里，由于物体的重量与质量成正比，因此重量也是惯性的量度。但是在多数情况下，描述流体的总质量或者总重量是没有意义的。因此往往用密度来表征流体的惯性。

密度是单位体积流体的质量，以符号 ρ 来表示。

各点密度完全相同的流体，称为均质流体。而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

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1-3}$$

式中 ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；
 m ——流体的质量， kg ；
 V ——流体的体积， m^3 。

对于非均质流体中某点的密度，则可表示为

$$\rho=\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1-4}$$

式中 ρ ——某点流体的密度， kg/m^3 ；
 Δm ——为微小体积 ΔV 内的流体质量， kg ；
 ΔV ——该微小流体的体积， m^3 。

通常，流体的密度随压强和温度而变化。由于液体的密度随压强和温度的变化很小，一般情况下可视为常数。如果流体的密度始终不变，则称为不可压缩流体，可用 $\rho=C$ （ C 为常数）来表示。表 1-1 列举了水在 101.325kPa（一个标准大气压）时，不同温度时的密度。对气体来说，温度和压强的变化对气体密度的影响很大，一般不能视为常数。但空气和那些远离液相的实际气体，可近似作为理想气体加以研究，用理想气体的状态方程来表示密度和压强、温度的关系，即

$$\frac{p}{\rho}=RT \tag{1-5}$$

式中 p ——气体的绝对压强，Pa；
 T ——气体的热力学温度，K；
 ρ ——气体的密度， kg/m^3 ；
 R ——气体常数，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。对于空气， $R=287$ ；对于其他气体，在标准状态下， $R=8314/n$ ，式中 n 为气体分子量。

表 1-1 水的密度

温度/℃	0	4	10	20	30
密度/(kg/m ³)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度/℃	40	50	60	80	100
密度/(kg/m ³)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

当温度不变（等温）时，状态方程写成常用形式

$$\frac{p}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \quad (1-6)$$

当气体在很高的压强、很低的温度下，或接近液态时，就不能当作理想气体看待，式(1-6)不再适用。

当压强不变（定压）时，状态方程可简化为

$$\rho_0 T_0 = \rho T \quad (1-7)$$

式中，热力学温度 $T_0 = 273\text{K}$ ， ρ_0 是 T_0 时的密度。 T 是某一热力学温度， ρ 是 T 时的密度。

表 1-2 列举了在压强为 101.325kPa（标准大气压——海平面上 0℃时的大气压强，即等于 760mmHg）下，不同温度时的空气密度。

表 1-2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度/℃	20	20	20	20	15	15
密度/(kg/m ³)	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030

在流体力学计算中常用的流体密度如下：

水的密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ；

汞的密度 $\rho_{\text{Hg}} = 13595\text{kg/m}^3$ ；

干空气在温度为 290K、压强为 760mmHg 时的密度为 $\rho_a = 1.2\text{kg/m}^3$ 。

【例 1-1】 已知压强为 98.07kPa、0℃时，烟气的密度为 1.34kg/m^3 。若压强不变，求 200℃时烟气的密度。

解：因压强不变，故为定压情况。用式(1-7)

$$\begin{aligned} \rho_0 T_0 &= \rho T \\ T &= T_0 + t = 273\text{K} + t \end{aligned}$$

则
$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} = 1.34 \times \frac{273}{273 + 200} = 0.77\text{kg/m}^3$$

二、流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增加，流体体积缩小；随着温度的增高，流体体积膨胀，这是所有流体的共同属性，即流体的压缩性和膨胀性。

1. 流体的压缩性

流体受压，体积减小，密度增大的这种性质，称为流体的压缩性。流体的压缩性用体积压缩系数 α_p 来表示，即在一定的温度下，增加单位压强所引起的流体体积相对变化值。设流体的体积为 V ，当压力增加 dp 后，体积减小 dV ，则体积压缩系数

$$\alpha_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-8)$$

因为流体受压体积减小, dp 和 dV 异号, 为保证 α_p 为正值, 式(1-8) 右侧加负号。 α_p 值与流体的压缩性成正比, α_p 的单位 Pa^{-1} 。

根据流体受压前后质量无改变, 即

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0$$

所以

$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

故体积压缩系数 α_p 又可表示为

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-9)$$

实际运用中, 通常用流体体积压缩系数的倒数来表征流体的压缩性, 称为流体的体积弹性模量, 以 E 来表示, 即

$$E = \frac{1}{\alpha_p} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-10)$$

式中 E ——流体的体积弹性模量, Pa ;

dp ——流体压强的增加量, Pa ;

V ——原有流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增加量, m^3 。

表 1-3 是温度为 0°C 时, 不同压强下水的压缩系数。

表 1-3 水的压缩系数 (0°C 时)

压强/ kPa	490	980	1960	3920	7840
$\alpha_p/(\text{m}^2/\text{N})$	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

体积弹性模量 E 随流体的温度、压强以及种类而变化, 它的大小反映出流体压缩性的大小, E 值愈大, 流体的压缩性愈小; E 值愈小, 流体的压缩性愈大。

压缩性是流体的基本属性。任何流体都是可以被压缩的, 只不过可压缩的程度不同而已。通常液体的压缩性很小, 在比较大的压力变化范围内, 密度仍然变化很小, 则视为常数, 因此, 对于一般的液体平衡和运动问题, 可按不可压缩流体处理。但是, 在水击现象等问题中, 则不能忽略液体的压缩性, 必须按可压缩流体来处理。气体的压缩性远大于液体, 是可压缩流体。但是, 如果气体在流动过程中密度变化不大, 可忽略密度的变化, 也不会对所处理的问题产生较大的误差, 则可忽略气体的压缩性。例如, 动力工程中的空气、烟气管道内气体的流速均低于 30m/s , 可按不可压缩流体处理。

2. 流体的膨胀性

流体受热, 体积增大, 密度减小的这种性质, 称为流体的膨胀性。流体的膨胀性用体积膨胀系数 α_v 来表示, 即在一定的压强下, 增加温度所引起的体积相对变化值。设流体的体积为 V , 当温度增加 dT 后, 体积增大 dV , 则体积膨胀系数

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-11)$$

式中 α_v ——流体的体积膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$, K^{-1} ;

dT ——流体温度的增加量, $^\circ\text{C}$, K ;

V ——原有流体的体积, m^3 ;

dV ——流体体积的增加量, m^3 。

体积膨胀系数 α_v 随流体的温度、压强以及种类而变化。一般情况下, 液体的体积膨胀

系数很小, 在工程问题中当温度变化不大时, 可忽略不计, 而对于气体, 体积膨胀系数却有很大影响。

在一些工程问题中, 还经常用到相对密度这一概念。流体的相对密度是指该流体的重度与水在温度为 4°C 时的重度之比。或者指该流体的密度与 4°C 水的密度之比。很显然, 相对密度是一个无量纲量。

三、流体的黏性

黏性是流体抵抗剪切变形的一种属性。当流体内部的质点间或流层间发生相对运动时, 而产生切向阻力 (摩擦力) 抵抗其相对运动的特性, 称作流体的黏性。黏性是流体的重要属性, 是流体运动中产生阻力和能量损失的主要因素。在流体力学研究中, 流体黏滞力十分重要。

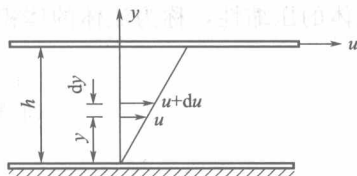


图 1-3 流速变化关系图

流速 u 随垂直于流速方向 y 而变化的关系图, 即 $u=f(y)$ 的函数关系曲线, 称为流速分布图。倘若两平板之间的距离很小, 而且平板移动速度不大时, 可以认为平板间每层流体的速度分布是直线分布, 否则就是曲线分布。

实际上, 流体在运动时, 各层之间都会产生摩擦阻力。由于速度大的上层流体将带动速度小的下层流体向右运动, 而下层流体将阻滞上层流体的运动, 流层间便产生大小相等、方向相反的切向阻力, 也称摩擦阻力或黏滞力。设任意两层流体, 它们之间的距离为 dy , 它们之间的速度差为 du , 则这两层流体之间单位面积所受到的切向力 (简称切力) T 的大小与接触面积 A 和速度梯度 du/dy 成正比, 且与流体的种类有关, 其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式中 μ ——流体的动力黏度。表征流体抵抗变形的能力, 与流体的种类、压强以及温度有关, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

A ——上平板的面积, m^2 ;

du/dy ——速度梯度, 表示速度随垂直于速度方向的 y 的变化率, s^{-1} 。

单位面积上的内摩擦力称为切应力, 以 τ 表示, 单位为 Pa , 则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

式(1-12)和式(1-13)称为牛顿内摩擦定律。

为了分析的方便, 在管中运动流体中取矩形微元平面 $abcd$, 如图 1-4(a) 所示。图

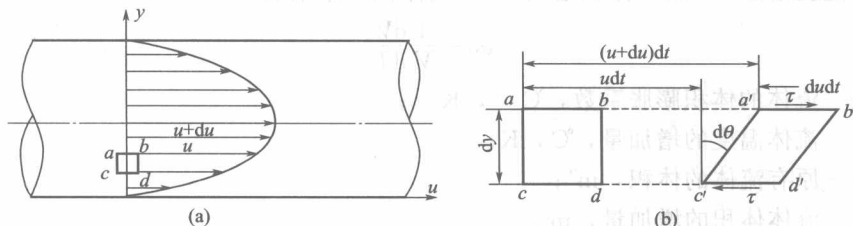


图 1-4 流体质点的直角变形速度

1-4(b)是矩形微元平面的放大图。由于上、下层流速相差 du ，经过 dt 时段，矩形微元平面将发生角变形，变形角为 $d\theta$ ，角变形速度为 $d\theta/dt$ 。根据几何关系，可得

$$d\theta \approx (\tan d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

故
$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt}$$

于是，式(1-13)可变形为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \tag{1-14}$$

因此，速度梯度就是直角变形速度。由于直角变形速度是在切应力作用下发生的，所以也称作剪切变形速度。

从上式可看出，切应力的大小与流体的角变形速度成正比。对于相接触的两个流层：流速较快的流层对较慢的流层作用，则 τ 的方向与流动方向相同；流速较慢的流层对较快的流层作用，则 τ 的方向与流动方向相反。

在流体力学中，经常会出现 μ/ρ 的比值，我们将这个比值定义为运动黏度 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ ，故
$$\nu = \mu/\rho \tag{1-15}$$

黏度是流体的重要属性，它与流体温度、压强以及种类有关。在工程常用的温度和压强范围内，温度对流体黏度的影响很大。液体的黏度随温度升高而减少，气体的黏度随温度升高而增大。这是由流体黏性的微观机制决定的：液体的黏性主要由分子内聚力决定，当温度升高时，液体分子运动幅度增大，分子间平均距离增大，分子间吸引力随间距增大而减少，使内聚力减少，黏度相应减少；气体的黏度主要由分子动量交换的强度决定，当温度升高时，分子运动加剧，动量交换剧烈，切应力随之增大，使黏度也相应增大。压强对于流体黏度影响很小，故一般可以忽略不计。只有发生几百个大气压变化时，黏度才有明显改变，在高压作用下，液体和气体的黏度都将随压强的升高而增大。

表 1-4、表 1-5 列出了在标准大气压下，水和空气在不同温度下的黏度值。

表 1-4 不同温度下水的黏度

温度/℃	密度/(kg/m³)	温度/℃	密度/(kg/m³)	温度/℃	密度/(kg/m³)
0	999.9	15	999.1	60	983.2
1	999.9	20	998.2	65	980.6
2	1000.0	25	997.1	70	977.8
3	1000.0	30	995.7	75	974.9
4	1000.0	35	994.1	80	971.8
5	1000.0	40	992.2	85	968.7
6	1000.0	45	990.2	90	965.3
8	999.9	50	988.1	95	961.9
10	999.7	55	985.7	100	958.4

表 1-5 不同温度下空气的黏度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

四、牛顿流体和非牛顿流体

将作纯剪切流动时满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体；否则，称为非牛顿流体。

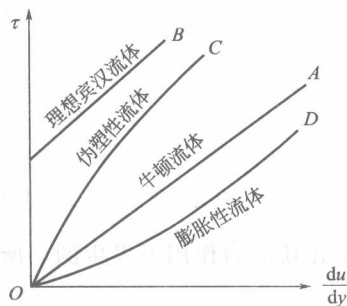


图 1-5 牛顿流体与非牛顿流体

如图 1-5 所示，A 线就是牛顿流体，常见的牛顿流体有水、空气等，B 线、C 线和 D 线均为非牛顿流体。其中，B 线被称作理想宾汉流体，如泥浆、血浆等，这类流体只有在切应力达到某一值时，才会产生剪切变形，且变形速度是常数。C 线被称作伪塑性流体，如油漆、颜料、泥浆等，其黏度随角变形速度的增大而减小。D 线被称作膨胀性流体，如浓淀粉糊、生面团等，其黏度随角变形速度的增大而增大。

综上所述，牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体。非牛顿流体是流变学的研究对象，本教材只讨论牛顿流体。

五、实际流体与理想流体

实际流体都具有黏性。不具有黏性的流体称为理想流体，它是客观世界中并不存在的一种假想的流体。在研究很多流动问题时，由于实际流体本身黏度小或所研究区域速度梯度小，使得黏性力与其他力（例如重力、惯性力等）相比很小，此时可以忽略流体的黏性。按理想流体建立基本关系式，这样可以大大简化流体力学问题的分析和计算，并能近似反映某些实际流体流动的主要特征。如果是黏性占主要地位的实际流体的流动问题，也可从研究理想流体入手，再研究更复杂的实际流体的流动情况。在解决流体力学问题时，如果考虑表面力中的切应力（黏性力）会引起许多数学上的困难，而且从牛顿内摩擦定律中可以看出，当流体的黏度 μ 很小，同时 du/dy 又很小时，往往 τ 可以忽略不计，并能得到实际的精确度。因为这个缘故，在流体力学中引入了非黏性流体或理想流体的概念。这种流体其表面力中只有压强而没有黏性力（切应力）。这一抽象，在科学和实用上有很大的价值，它使讨论的问题大为简化，易于得到简单明了的解答。

【例 1-2】 动力黏度 $\mu = 0.172 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的润滑油充满在两个同轴圆柱体的间隙中，如图 1-6，外筒固定，内径 $D = 120 \text{ mm}$ ，间隙 $\delta = 0.2 \text{ mm}$ ，试求：①当内筒以速度 $u = 1 \text{ m/s}$ 沿轴线方向运动时 [图 1-6(a)]，内筒表面的切应力 τ_1 ；②当内筒以转速 $n = 180 \text{ r/min}$ 旋转时 [图 1-6(b)]，内筒表面的切应力 τ_2 。

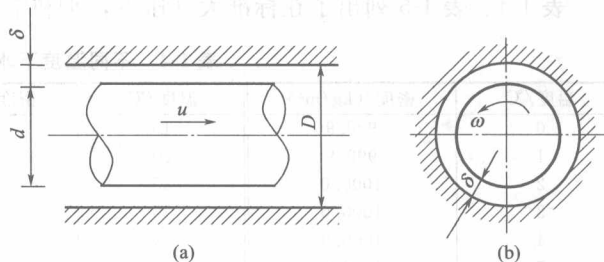


图 1-6 同轴圆柱体的切应力

解：内筒外径 $d = D - 2\delta = 120 - 2 \times 0.2 = 119.6 \text{ mm}$

① 当内筒以速度 $u = 1 \text{ m/s}$ 沿轴线方向运动时，内筒表面的切应力

$$\tau_1 = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u}{\delta} = \frac{0.172 \times 1}{0.2 \times 10^{-3}} = 860 \text{ Pa}$$

② 当内筒以转速 $n = 180 \text{ r/min}$ 旋转时，内筒的旋转角速度 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，内筒表面的切应力

$$\tau_2 = \mu \frac{\omega D}{2\delta} = \frac{0.172 \times \frac{2\pi \times 180}{60} \times 119.6 \times 10^{-3}}{2 \times 0.2 \times 10^{-3}} = 968.9 \text{ Pa}$$

六、液体的表面张力和毛细现象

1. 表面张力

由于分子间的吸引力，在液体的自由表面上能够承受极其微小的张力，这种张力称为表面张力。表面张力通常发生在液体与气体相接触的周界面上，也可以在液体与固体或两种不同液体相接触的周界面上发生。比如，在液体和气体相接触的自由表面上，边界上的分子受到液体内部分子的吸引力与其上部气体分子的吸引力不平衡，最终合力的方向与液面垂直并指向液体内部。在合力的作用下，表层中的液体分子都趋于向液体内部收缩，将液面上的分子尽可能地压向液体内部，让液体具有尽量缩小其表面的趋势，于是沿液体的表面便产生了表面张力。

表面张力的大小，可以用表面张力系数 σ 来表示，它的单位是 N/m。 σ 的大小与液体的温度、纯度、性质和与其接触的介质有关。表 1-6 列出了各种液体与空气接触的表面张力系数。

表 1-6 几种液体与空气接触时的表面张力系数

流 体 名 称	温度/℃	表面张力系数 σ /(N/m)	流 体 名 称	温度/℃	表面张力系数 σ /(N/m)
水	20	0.07275	丙酮	16.8	0.02344
水银	20	0.465	甘油	20	0.065
酒精	20	0.0223	苯	20	0.0289
四氯化碳	20	0.0257	润滑油	20	0.025~0.035

液体内部并不存在表面张力，它仅存在于液体的自由表面，所以它是一种局部受力现象。因为表面张力很小，通常对液体的宏观运动不起作用，可以忽略不计。可是，当涉及液体计量、物理化学变化、液滴和气泡的形成等问题时，则一定要考虑表面张力的影响。

2. 毛细现象

液体分子间存在的相互吸引力称为内聚力。如果液体和固体壁面接触，那么液体分子和固体分子间便会产生相互的吸引力称之为附着力。如果附着力比液体分子间的内聚力大，就会产生液体润湿固体的现象。如图 1-7 所示，玻璃细棒管竖立在水中，此时，接触角 α 为锐角，液体润湿管壁，管内液面升高，液面呈凹形。如果附着力比液体分子间的内聚力小，就不会产生液体润湿固体的现象，如图 1-8 所示，玻璃细棒管竖立在水银中，此时，接触角 α 为钝角，液体不能润湿管壁，管内液面下降，液面呈凸形。

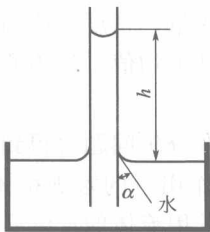


图 1-7 水的毛细现象

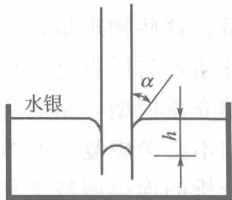


图 1-8 水银的毛细现象

上述现象称为毛细现象。根据表面张力的合力与毛细管中上升（或下降）液柱所受的重力相等，可求出液柱上升（或下降）的高度 h ，即

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