

高职高专规划教材

LIUTI LIXUE BENG YU FENGJI

流体力学 泵与风机

潘炳玉 主 编

薛永飞 副主编

时 阳 主 审



YZLI 0890089056



化学工业出版社

高职高专规划教材

本书以《全国高职高专教育工程类各专业指导性专业计划》为依据，参照《工程流体力学》课程教学大纲编写。本书可作为高职高专工程类各专业工程流体力学课程的教学用书，也可供从事工程流体力学工作的工程技术人员参考。

LIUTI LIXUE BENG YU FENGJI

流体力学 泵与风机

潘炳玉 主 编
薛永飞 副主编
时 阳 主 审



YZLI 0890089056



化学工业出版社

·北 京·

本书介绍了流体力学、泵与风机的相关知识,全书分为两篇。上篇为流体力学,具体内容包括流体的基本物理性质,流体静力学,流体动力学基础及一元流动,黏性流体动力学基础及管道流动,孔口、管嘴与气体射流,边界层理论简介,多元流动动力学基础,可压缩流体一元流动,明渠流动基础。下篇为泵与风机,具体内容包括泵与风机理论基础,离心式泵与风机运行调节,离心式泵与风机的选型与安装,其他常用泵与风机。

本书为高职高专建筑环境设备与工程专业、建筑水电设备专业及相关土建类专业教材用书,也可供相关技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 泵与风机/潘炳玉主编. —北京:化学工业出版社, 2010.9
高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-08668-6

I. 流… II. 潘… III. ①流体力学-高等学校:技术学院-教材②泵-高等学校:技术学院-教材③鼓风机-高等学校:技术学院-教材 IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 135904 号

责任编辑:卓丽 李仙华 王文峡
责任校对:郑捷

文字编辑:颜克俭
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:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数438千字 2010年8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:29.80元

版权所有 违者必究

前 言

流体力学、泵与风机是高职高专建筑环境设备与工程专业、建筑水电设备专业等相关土建类专业的重要专业基础课。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,适用于高职高专和相近本科专业。

本书包括两篇,上篇流体力学,主要阐述了流体静压强的基本特性和分布状况;流体动力学的连续性方程和能量方程及其应用;管路能量损失的计算;管路的水力计算;孔口、管嘴的出流规律及气体射流;边界层理论;一元气体动力学;明渠流动等。下篇泵与风机主要阐述了泵与风机的基本原理、构造和性能参数;泵与风机的运行、调节及选择。注重理论联系实际,注意与专业课的衔接,对课程内容进行了大量的调整,每章均引入学习指导,安排较多的例题和思考题,具有实用性和专业性的习题。

本书由潘炳玉主编,薛永飞副主编,编写分工如下:河南工程学院潘炳玉编写第二、五、九章;河南工程学院薛永飞编写第一、六、十、十三章;安徽理工大学邓海顺与薛永飞共同编写第八章;西安航空技术高等专科学校刘海华编写第三、四章;河南工程学院王迎辉和黄河勘测规划设计有限公司杜建伟共同编写第七章;浙江大学赵伟国博士编写第十一、十二章。全书在编写组的大力支持下完成,由潘炳玉和薛永飞统稿并定稿,由郑州轻工业学院时阳教授主审。

本书在编写过程及书稿会审中,承蒙各兄弟院校老师提出许多宝贵意见,在此一并致谢。但由于编者水平有限,不足之处难免,请广大读者及同行批评指正。

编 者
2010年8月

目 录

上篇 流体力学

第一章 流体的基本物理性质	1	三、质点速度、加速度	34
第一节 连续介质假设	2	第二节 描述流体运动的一些基本概念	35
第二节 流体的主要物理性质	2	一、恒定流与非恒定流	35
一、惯性和重力特性	3	二、流管、总流、流量、断面平均流速	36
二、流体的压缩性与膨胀性	3	三、一元流、二元流、三元流	36
三、流体的黏性, 牛顿内摩擦定律	4	四、均匀流与非均匀流、渐变流与急变流	37
四、液面的表面张力特性	7	第三节 流体运动的连续性方程	37
第三节 作用在流体上的力	7	一、流体运动的连续性方程	37
一、质量力	7	二、恒定总流的连续性方程	37
二、表面力	8	第四节 流体运动的能量方程	39
第四节 流体的力学模型	8	一、理想元流运动的能量方程	39
习题	9	二、总流运动的能量方程	40
第二章 流体静力学	10	三、能量方程的物理意义	41
第一节 流体静压强的特性	10	四、能量方程的应用	42
一、静压强和压力	10	五、测压管水头线与总水头线	46
二、流体静压强的特性	10	六、气流能量方程的应用	48
三、静压强单位和测量基准	11	第五节 流体运动的动量方程	50
第二节 流体静力学及其特性	12	一、动量方程	50
一、流体平衡微分方程	12	二、应用条件	51
二、平衡微分方程的积分形式	13	习题	52
第三节 压强的测量	14	第四章 黏性流体动力学基础及管道流动	58
一、等压面	15	第一节 两种流态和判别标准	58
二、测压管	15	一、雷诺实验和两种流动状态	58
三、水银测压计与 U 形测压计	15	二、流动状态的判别标准	59
四、压差计	16	第二节 流动阻力与能量损失的关系	60
五、金属测压计 (压力表)	16	一、沿程阻力和沿程损失	60
第四节 液体对平面壁面的作用力	17	二、局部阻力和局部损失	61
一、静水压强分布图	17	第三节 圆管中的层流运动	62
二、平面壁的总作用力及作用点	18	一、过流断面速度分布规律	63
第五节 作用于曲面壁的静止流体总压力	21	二、沿程水头损失	63
一、曲面压力的计算	21	三、非圆管流的沿程损失	63
二、压力体	22	第四节 圆管中的紊流运动	64
第六节 液体的相对平衡	24	一、紊流运动的分析方法	64
一、等加速直线运动的液体的相对平衡	24	二、紊流阻力和紊流速度分布	64
二、等角速度旋转容器中液体的平衡	25	第五节 紊流沿程阻力系数的确定	66
习题	27	一、紊流沿程阻力系数影响因素	66
第三章 流体动力学基础及一元流动	32	二、尼古拉兹实验曲线与紊流分区	66
第一节 流动描述	32	三、莫迪图	67
一、描述流体运动的两种方法	32		
二、迹线与流线	33		

四、紊流沿程阻力系数计算与应用	68	一、有旋流动和无旋流动的定义	127
第六节 局部阻力系数的确定	72	二、速度环量和旋涡强度	127
一、局部损失产生的原因	72	第三节 无旋流动的速度势函数	129
二、突然放大处的局部损失	73	一、速度势函数引入	130
三、局部阻力之间的相互干扰	76	二、速度势函数的性质	130
四、减小阻力的措施	76	第四节 二维平面流动的流函数	131
第七节 管路流动	77	一、流函数的引入	131
一、管路流动分类	77	二、流函数的性质	131
二、简单管路与阻抗	78	三、势函数和流函数的关系	132
三、管路的串联与并联	81	第五节 基本的平面有势流动	133
四、有压管中的水击	83	一、均匀直线流动	133
第八节 管网流动计算	85	二、平面点源和点汇	134
一、枝状管网计算	85	三、点涡	135
二、环状管网计算	88	第六节 平面势流的叠加流动	137
习题	90	一、势流叠加原理	137
第五章 孔口、管嘴与气体射流	94	二、螺旋流	138
第一节 孔口出流	94	三、偶极流	139
一、孔口自由出流	95	四、绕圆柱体无环量流动	140
二、孔口淹没出流	95	五、流网法解平面势流	143
三、孔口出流的应用	97	习题	144
第二节 管嘴出流	98	第八章 可压缩流体一元流动	146
第三节 气体射流	100	第一节 微弱扰动波的传播	146
一、无限空间淹没紊流射流	100	一、音速	146
二、温差浓差射流	102	二、马赫数	148
三、旋转射流	104	第二节 气体一维定常等熵流动	149
四、受限射流简介	105	一、气体一维定常流动的基本方程	149
习题	106	二、滞止参数	150
第六章 边界层理论简介	109	第三节 气体一维定常等熵变截面管流	151
第一节 边界层的基本概念	109	一、气流速度与密度的关系	151
第二节 边界层动量方程	111	二、气流速度与通道截面的关系	152
一、边界层微分方程	111	第四节 等温管路和绝热管路流动	154
二、边界层动量积分方程	112	一、有摩擦和热交换的一元定常运动基本方程	154
三、边界层的位移厚度和动量损失厚度	114	二、等截面绝热摩擦管流	155
四、边界层的近似计算	115	三、有热交换的等截面无摩擦管流	156
第三节 边界层的分离现象	115	习题	157
一、曲面边界层的分离	116	第九章 明渠流动基础	159
二、卡门涡街	117	第一节 明渠均匀流概述	159
第四节 绕流阻力与升力	118	一、棱柱形渠道	159
一、绕流阻力一般分析	118	二、渠道的断面形状	159
二、绕流升力的一般概念	120	三、明渠流的基本计算公式	161
习题	121	四、其他经验公式	162
第七章 多元流动动力学基础	122	第二节 明渠水力计算	163
第一节 流体微团运动分析	122	一、水力最优断面	163
一、表示流体微团运动特征的速度表达式	122	二、明渠均匀流渠道允许流速	164
二、流体微团运动的分解	124	三、明渠均匀流的水力计算	165
第二节 有旋流动和无旋流动	127	四、水跌和水跃	166
		第三节 堰流	167

一、堰流及其特征	167	三、堰流的计算公式	168
二、堰的分类	167	习题	169

下篇 泵与风机

第十章 泵与风机理论基础	171	三、泵与风机的隔振和隔声	211
第一节 概述	171	四、吸声与消声器	212
一、泵与风机的发展	171	习题	214
二、泵与风机的分类	172	第十二章 离心式泵与风机的选型与	
三、离心式泵与风机的工作原理	174	安装	216
四、泵与风机主要的性能参数	175	第一节 离心泵正常工作所需附件及扬程	
第二节 离心式泵与风机的结构	176	计算	216
一、离心泵的主要部件	176	一、离心泵正常工作所需附件	216
二、离心式泵的铭牌和型号	179	二、泵工作不同管路时的扬程计算	217
三、离心式风机的结构	179	第二节 离心泵的汽蚀与安装高度	218
第三节 基本方程——欧拉方程	182	一、离心泵的空化与空蚀现象	218
一、流体在叶轮内的运动及速度		二、离心泵的空化余量	219
三角形	182	三、泵的安装高度计算	220
二、欧拉方程	183	第三节 离心式泵与风机的选择	222
三、叶片数对欧拉方程之修正	184	一、选型原则	222
四、理论扬程 H_T 的组成	185	二、选用程序及注意事项	222
第四节 泵与风机的性能曲线	186	三、离心泵的选择方法及步骤	223
一、离心式叶轮叶片形式的分析	186	四、风机的选择方法及步骤	225
二、理论性能曲线	187	第四节 离心式泵与风机的运行	229
三、泵与风机的能量损失	188	一、离心式泵的启动与运行	229
四、实际性能曲线	190	二、离心式风机的操作方法	230
第五节 泵与风机的相似定律及其应用	191	三、离心式风机事故危险性分析与	
一、相似条件	191	评价	234
二、泵与风机的相似三定律	191	习题	235
三、风机的无量纲相似曲线	193	第十三章 其他常用泵与风机	237
四、比转数	195	第一节 轴流式泵与风机	237
习题	197	一、轴流式泵与风机的结构	237
第十一章 离心式泵与风机运行		二、轴流式风机的叶栅理论	238
调节	199	三、轴流风机的性能曲线	240
第一节 管路性能曲线及泵与风机的		第二节 横流风机	243
工作点	199	一、横流风机结构及工作原理	243
一、管路性能曲线	199	二、横流风机的应用	244
二、工作点	201	第三节 真空泵	245
三、工作点的稳定性分析	201	一、水环式真空泵	245
第二节 泵与风机的联合工作	202	二、罗茨真空泵工作原理	245
一、串联工作	202	三、旋片式真空泵工作原理	246
二、并联工作	203	第四节 管道泵	246
三、并联工作的特点	204	第五节 往复式泵	247
第三节 泵与风机的工况调节方法	204	第六节 深井泵	249
一、调节方法分类	204	第七节 旋涡泵	250
二、泵与风机的调节方法	205	习题	251
第四节 泵与风机的振动与噪声	208	附录 泵与风机性能曲线图	252
一、振动与噪声基础	208	参考文献	255
二、泵与风机的抗振与防噪	211		

上篇 流体力学

第一章 流体的基本物理性质



知识点

流体的主要物理性质，黏滞性，力学模型，作用力。



能力目标

掌握：连续介质假设，惯性和重力特性，压缩性和膨胀性，牛顿内摩擦定律，黏滞系数，黏滞力的应用。作用在流体上的力和力学模型。

理解：流动运动的基本特点和液体的表面张力。

流体是在任意微小切应力的作用下，都会产生连续变形的物质。通俗地说，流体即流动的物质。

流体力学是力学的一个分支，它研究流体静止和运动的力学规律，流体和固体边界的相互作用，及其在工程技术中的应用。一般来说，流体力学学科体系包括理论流体力学、工程流体力学和数值流体力学，本书着重于工程流体力学的研究。

随着科学和技术的发展，流体力学已经深入到各个科技领域与生产部门。目前，已经很难找出一个技术部门与流体力学没有或多或少的联系。供热通风与空调工程的热供应、空气调节、除尘降温等，都是以流体为工作介质，对流体的流动有效地加以组织来实现的。水利工程的建设，河流的治理及利用，水库、大型水利枢纽的设计与建造，洪峰预报，环境污染预报，河流泥沙的预测（例如黄河的泥沙）都与流体力学紧密相连。此外，航空与航海，石油化工、冶金、土建、粮食加工、气象等部门，都离不开流体动力学及空气动力学的基本原理，甚至又逐步发展成新的学科（边缘流体力学）。

流体力学作为一门独立的学科，开始于伯努利（1700—1783）和欧拉（1707—1783）所处的18世纪。伯努利首先采用了流体动力学这个术语（并将流体静力学和水力学包括在这门科学之内），并且他还发现了以他的名字命名的著名的伯努利方程。欧拉则创立了理想流体的运动方程，并且发展了有关教学理论。19世纪初期和中期，纳维尔（1785—1836）和斯托克斯（1819—1903）分别导出了黏性流体的运动方程式即N-S方程，并且，斯托克斯被看做是近代流体力学理论的奠基人。20世纪以后，儒可夫斯基（1847—1921）发展了机翼外力理论，对机翼设计作出了杰出的贡献。普朗特（1875—1953）在1904年提出了边界层理论，从而使黏性流体和无黏性流体的概念协调起来。并且，由于升力理论和边界层理论的建立，使流体力学脱离了纯理论的研究而开始了与工程实际相结合。

学习流体力学，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,基本单位是长度(米,m)、质量(千克,kg)和时间(秒,s),力为导出单位,单位为牛顿(N)。由于我国长期采用工程单位,专业设备上某些量有时仍表以工程上习惯单位,学习者必须注意两种单位的换算。常用的换算基本关系式为 $1\text{kgf}=9.807\text{N}$ 。

第一节 连续介质假设

连续介质假设认为流体质点连续地充满了流体所在的整个空间,流体的宏观物理量(如速度、压强、温度等)遵循一切应该遵循的物理定律及输运性质,但某些常数仍需实验确定。流体是由大量分子组成的,所谓流体质点就是指微观充分大(其中包含大量分子)、宏观充分小的分子团。并且分子团的尺寸远远小于被研究流体所占据的空间,即认为此分子团内的物理量是均匀不变的,因而可近似地把这个分子团看做是几何上的一个点,即流体质点。

瑞士学者欧拉在1753年提出了连续介质假设。任何种类的流体,从微观角度看,并不是连续分布的物质,而均是由无数分子组成的。由于分子之间总是存在间隙,故流体的物理

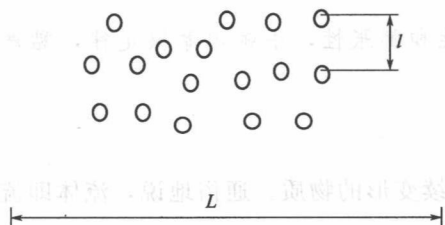


图 1-1 分子距离与宏观尺寸比较

量在空间非连续分布。但是,由于分子与分子之间的距离比工程中被研究流体所占空间的尺寸远小得多(在标准状态下, 0°C , 一标准大气压 $760\text{mmHg} = 101325\text{N/m}^2$, 1mm^3 空气就含有 2.7×10^{16} 个分子), 即 $l \ll L$ 。因此在研究宏观的流体流动时不考虑流体分子之间的间隙,而将流体看做是由无数流体质点连续地、无空隙地充满的介质,这称为连续介质假设(由于实际上流体分子之间是有间隙的,并非连续分布的介质,所以叫做假

设)。分子距离与宏观尺寸比较如图 1-1 所示。

连续介质假设是流体力学中第一个带有根本性的假定,正是有了连续介质假设,才可以将一个微观的问题化为宏观的问题来处理,从而可利用数学分析中连续函数这个工具来研究流体的运动和平衡规律。

正是由于有了连续介质假设,流体的各个物理量才可以看做是空间与时间的连续函数,故有:

$$\begin{cases} P = f_1(x, y, z, t) \\ V = f_2(x, y, z, t) \\ \rho = f_3(x, y, z, t) \end{cases}$$

式中, f_1 、 f_2 、 f_3 均为连续函数; t 为时间。

但是,对于稀薄气体中飞行的火箭、高真空技术等,连续介质假设不再适用。

第二节 流体的主要物理性质

和固体比较,流体存在着抗拉、抗压和抗切三方面的能力。流体(液体和气体)的抗拉能力极弱,抗切能力也很微小,只要受到切力作用,不管此切力怎样微小,流体都要发生不断变形。流体的这个性质,称为流动性,这是它便于管道、渠道进行输送,适宜作供热、供冷等工作介质的主要原因。流体的抗压能力较强,这个特性和流动相结合,便人们能够利用水压推动水轮机发电,利用蒸汽压力推动汽轮机发电,利用液压、气压

传动各种机械。

现在阐述与流体运动相关的几个主要物理性质。

一、惯性和重力特性

惯性是物体维持原有运动状态能力的性质，常用流体的密度来表征。任取一块流体，体积为 V ，质量为 m 。则平均密度为：

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

而在这块流体中再取一流体微团，它的质量为 δm ，体积为 δV ，则流体微团的密度为：

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-2)$$

这里 $\delta V \rightarrow 0$ ，是一个无穷小的体积，但仍然包含足够多的流体分子，也就是说，流体作为连续介质假设的基础仍然成立。

重力特性是指流体受地球引力作用的特性，常用容重来表征。对于均质流体，作用于单位体积流体的重量称容重，以 γ 表示：

$$\gamma = G/V \quad (1-3)$$

式中 γ ——流体的容重， N/m^3 ；

G ——体积为 V 的流体所受的重力， N ；

V ——重力为 G 的流体体积， m^3 。

和点密度相同，对于非均质流体，任一点的容重为：

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

重量是质量和重力加速度的乘积，即：

$$G = mg \quad (1-5)$$

两端同除以体积 V ，则得容重和密度的常用关系：

$$\gamma = \rho g \quad (1-6)$$

二、流体的压缩性与膨胀性

1. 流体的压缩性

流体受到压缩体积就要变小的特性称为流体的压缩性，在等温条件下，用 β 来表示流体受到压缩时体积缩小的程度：

$$\beta = \frac{-dV/V}{dp} \quad (1-7)$$

β 为体积压缩系数，表示压力每增加一个单位，单位体积流体的体积变化量。由于压力与体积的变化方向相反，为使 β 为“+”，故等号右边带一负号。（注意： β 不会出现负值）

要使水的体积改变 1%，需要在原有压力的基础上再加上 204 个大气压。而在一般工程中，压力不可能达到这么高，所以，可以将水近似地作为不可压流体来对待，但在高压锅炉以及水击中，必须要考虑水的压缩性。

通常把气体作为可压缩流体来处理，但在流速不高的情况下，也可作为不可压流体来处理。例如，空气在标准大气压下， $u=68m/s$ 时，不考虑压缩性带来的相对误差为 1%，一般情况下，这样的近似误差在工程上是允许的。

对于流体，当 dp 确定时， β 大，则易压缩； β 小，则不易压缩； $\beta=0$ ，表示完全不可压。流体的体积压缩系数的倒数为体积弹性模量。

2. 流体的膨胀性

物体具有热胀冷缩的性质，流体也不例外，称为流体的膨胀性，流体的膨胀性用体积膨

胀系数 α 表示：

$$\alpha = \frac{dV/V}{dT} (1/K) \text{ 或 } (1/^{\circ}C) \tag{1-8}$$

式(1-8) 表示温度升高 $1^{\circ}C$ 或 $1K$ 时，单位体积流体的体积变化量。

表 1-1 和表 1-2 列出了不同温度时的水和空气的密度及容重。

表 1-1 一个大气压下水的容重及密度

温度/ $^{\circ}C$	容重 ^① /(kN/m^3)	密度 /(kg/m^3)	温度/ $^{\circ}C$	容重 ^① /(kN/m^3)	密度 /(kg/m^3)	温度/ $^{\circ}C$	容重 ^① /(kN/m^3)	密度 /(kg/m^3)
0	9.806	999.9	15	9.799	999.1	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	20	9.790	998.2	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	45	9.710	990.2	90	9.467	965.3
8	9.806	999.9	50	9.690	988.1	95	9.433	961.9
10	9.805	999.7	55	9.657	985.7	100	9.399	958.4

① 在国际单位制中常将 10^3 写成千，以符号 k 表示， 10^6 写成兆，以符号 M 表示。

表 1-2 在标准大气压^①时的空气容重及密度

温度/ $^{\circ}C$	容重 /(N/m^3)	密度 /(kN/m^3)	温度/ $^{\circ}C$	容重 /(N/m^3)	密度 /(kN/m^3)	温度/ $^{\circ}C$	容重 /(N/m^3)	密度 /(kN/m^3)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185	60	10.40	1.060
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165	70	10.10	1.029
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146	80	9.81	1.000
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128	90	9.55	0.973
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093	100	9.30	0.947

① 为海平面上 $0^{\circ}C$ 时的大气压强，即等于为 $101.325kPa$ ($760mmHg$)。

三、流体的黏性，牛顿内摩擦定律

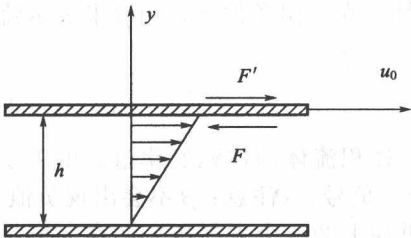


图 1-2 牛顿内摩擦定律原理

牛顿经过大量实验研究，在 1686 年提出了确定流体内部摩擦力的公式即牛顿内摩擦定律。实验如图 1-2 所示，设有两块相距为 h 的平板，两板间充满均匀的真实流体，平板面积 A 足够大，可忽略平板四周边界的影响。下板固定不动，上板在切向力 F' 的作用下，以速度 u_0 做匀速直线运动。

试验发现，流动具有下列特点。

(1) 与上板接触的流体粘在上板上，并以速度 u_0 随上板运动，与下板接触的流体粘在下板上，速度为零，两板间的流体速度呈线性分布，即 u 是 y 的一次函数：

$$u = \frac{u_0}{h} y$$

(2) 比值 F/A 与比值 u/h 成正比，即：

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{u - 0}{h}$$
$$F = A \mu \frac{u - 0}{h}$$

式中, μ 为比例系数, 通常称作动力黏度, 是个物性系数, 与流体的种类、温度有关, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; F 为流体对平板的摩擦阻力, 与 F' 互为作用力与反作用力; A 为平板面积。

一般情况下, 某一截面 (例如: 管内流动的某一截面) 的流体速度分布并非线性函数, 而是曲线分布 (图 1-3), 则:

$$F = \mu A \frac{(u + du) - u}{dy} = \mu A \frac{du}{dy} \tag{1-9}$$

单位面积的摩擦阻力:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-10}$$

式(1-10) 即为牛顿切应力公式或牛顿内摩擦定律, 即单位面积的摩擦力与速度梯度成正比, 其比例系数为 μ 。 μ 与流体的种类、温度、压力有关, 但一般的压力对流体的黏度几乎没有影响, 所以对确定的流体, $\mu = f(t)$, $\tau \propto \frac{du}{dy}$ 。表 1-3 和表 1-4 列举了水和空气在不同温度下的黏滞系数。

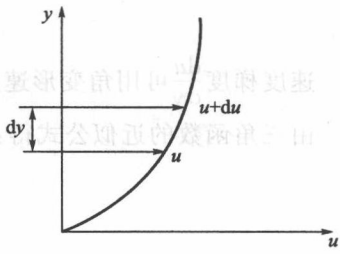


图 1-3 速度分布示意

表 1-3 水的黏滞系数

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
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

表 1-4 一个大气压下的空气黏滞系数

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/(\times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

由表 1-3 和表 1-4 可以看出, 水和空气的黏滞系数随温度变化的规律是不同的, 这是因为对液体来说, 产生黏性的原因主要是分子吸引力, t 升高, 分子间距加大, 分子间吸引力减小, μ 减小。对气体来说, 产生黏性的原因主要是分子热运动产生动量交换的结果, t 升高, 运动加强, 分子运动阻力加大, μ 升高。

流体力学中还经常应用运动黏滞系数, 其定义为单位体积质量下的运动黏度, 单位为 m^2/s 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 可用角变形速度来表示。如图 1-4 所示, 取一小块流体进行研究。

由三角函数的近似公式得:

$$\tan \varphi = \frac{du}{dy} = d\varphi \Rightarrow \frac{d\varphi}{dt} = \frac{du}{dy}$$

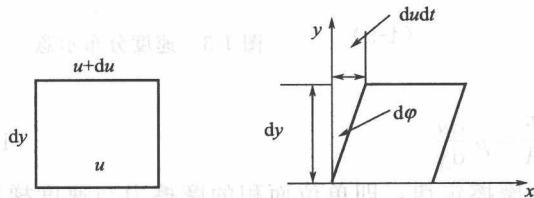


图 1-4 流体质点的直角变形速度

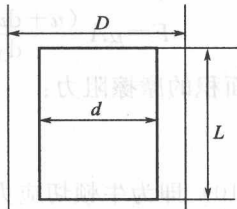


图 1-5 活塞运动

可以说, 牛顿的内摩擦定律也同时反映了角变形运动的大小。

【例 1-1】 油压机的活塞在自重及摩擦力的作用匀速下落 (图 1-5)。已知活塞自重 $G=190\text{N}$, $d=152\text{mm}$, $D=152.02\text{mm}$, $L=200\text{mm}$ 。

- (1) 若采用 $\mu=0.048\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的油, 试求活塞的下降速度;
- (2) 若下落速度 $U=39\text{mm/s}$, 试确定油的动力黏性系数。

解 因黏性作用, 黏附在汽缸内壁的油层速度为 0, 黏附在活塞外沿的油层速度与活塞速度相同。因此, 油层的速度由零增至活塞速度大小, 油层间相对运动产生切应力, 切应力的大小与活塞的自重 (即重力) 相等。其中的速度分布认为是线性分布。则:

$$\frac{du}{dy} = \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{U-0}{(D-d)/2} = \frac{2U}{D-d}$$

- (1) 由牛顿内摩擦定律得到的切应力和重力相等, 有:

$$F = \mu A \frac{du}{dy} = \mu \pi d L \cdot \frac{2U}{D-d} = G$$

$$\text{则 } U = \frac{G(D-d)}{2\mu\pi dL} = \frac{190 \times (152.02 - 152) \times 10^{-3}}{2\pi \times 0.048 \times 152 \times 200 \times 10^{-6}} = 0.414 \text{ (m/s)}$$

- (2) 已知 U 求 μ 是牛顿内摩擦定律的反问题应用。

$$\mu = \frac{G(D-d)}{2U\pi dL} = \frac{190 \times (152.02 - 152) \times 10^{-3}}{2\pi \times 39 \times 10^{-3} \times 152 \times 200 \times 10^{-6}} = 0.51 \text{ (Pa}\cdot\text{s)}$$

实际流体均具有黏性, 即 $\mu \neq 0$, 所以实际流体又称为黏性流体, $\mu=0$ 的流体则称为理想流体, 理想流体在实际中是不存在的, 是人们为了解决实际问题对于真实流体所作的一种抽象模型。

① 静止流体, 黏性表现不出来, 所以对流体力学而言, 静止流体既可作为理想流体, 也可作为黏性流体。

② 匀速运动, (对平板上势流 $\frac{du}{dy}=0$, 但曲面势流 $\frac{du}{dy} \neq 0$), 由于 $\frac{du}{dy}=0$, 则 $\tau=0$, 这时可把实际流体作为理想流体来处理, 问题分析大为简化。

③ 黏性不起主要作用的场合, 即黏性力远小于其他力时, 先不计黏性的影响, 进行分析计算, 然后, 再根据实验, 引进黏性修正系数进行修正。

可以这么说, 凡作用在流体上的切向应力和与它所引起的速度之间存在线性正比关系的

流体,称为牛顿流体。换句话说,或凡符合牛顿切应力公式的流体称作牛顿流体,否则,称为非牛顿流体,需要黏性系数修正。各种流体切应力与速度梯度间的关系如图 1-6 所示。

本书仅讨论牛顿流体,牛顿内摩擦定律也仅适用于牛顿流体,并且仅适用于层流运动。非牛顿流体是流变学研究的内容,本书不作讨论。

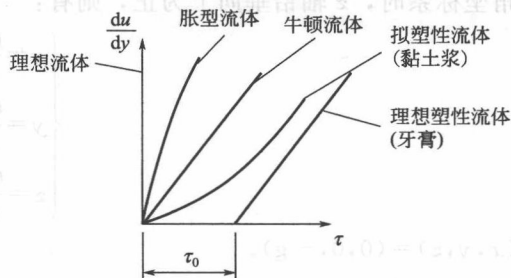


图 1-6 牛顿流体与非牛顿流体

四、液面的表面张力特性

液体表面相邻两部分之间单位长度内相互吸引的力称为表面张力。单位长度上作用力称为表面张力,记为 σ ,也称为表面张力系数。不浸润现象——当液体与固体接触时,液体分子之间的吸引力大于液体与固体之间的吸引力,则液体就自己抱成团与固体不浸润,即不湿润固体,这种现象就叫不浸润现象(例如,玻璃板上滴一滴水银)。毛细现象如图 1-7 所示。

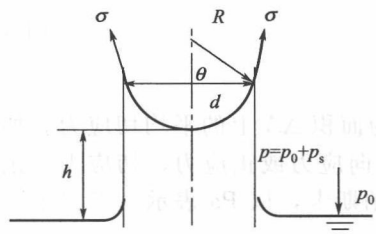


图 1-7 毛细现象

浸润现象——当液体分子之间的吸引力小于液体和固体之间的吸引力,则液体就能湿润固体表面,这种现象称为浸润现象(例如,干净的玻璃板上滴一滴水滴,水滴便很快向四周扩展)。将一细玻璃管插入水中,由于水与玻璃间附着力大于内聚力,则液面上凹,若管子

很细,则管内液面可近似看做是一球面,其受力特点为表面张力的合力的垂直分量等于升高液柱的重量,则:

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

$$h = \frac{4\sigma}{\rho g d} \cos\theta \quad (1-12)$$

在大多数工程实际问题中,同其他一些作用力相比,表面张力可忽略不计。但在某些液柱式测压计等小尺寸的仪器中,表面张力的作用必须考虑,否则将产生较大的测量误差。另外,在传热学中,研究大容器沸腾中气泡的形成,也要考虑表面张力。在自然现象中,水能沿着树干中的毛细管上升数十米,滋润顶端的树叶,是毛细作用在自然现象中的表现。

第三节 作用在流体上的力

研究流体运动规律,首先必须分析作用于流体的力,力是使流体运动状态发生变化的外因。根据力作用方式的不同,可以分为质量力和表面力。

一、质量力

质量力是作用于流体体积上每一个质点(或微团)上的力,又名体积力。时常把作用于某点的单位质量的质量力,简称为单位质量力,用 f 或 (x, y, z) 表示。单位质量力的单位是 N/kg ,其量纲与加速度的量纲相同,是 LT^{-2} 。

流体力学中碰到的普遍情况是流体所受的质量力只有重力。由于重力 G 的大小与流体质量成正比, $G = mg$,所以流体所受的单位质量力的大小等于重力加速度。当采用惯用的

直角坐标系时, z 轴铅垂向上为正, 则有:

$$\begin{cases} x = \frac{G_x}{m} = 0 \\ y = \frac{G_y}{m} = 0 \\ z = \frac{G_z}{m} = -g \end{cases} \quad (1-13)$$

即 $(x, y, z) = (0, 0, -g)$ 。

二、表面力

表面力是作用在所考虑的流体(或称分离体)表面上的力。正确地分析作用在所考虑的流体系统上的表面力是其重要的, 表面力常采用在该面上的单位表面力的切向分力和法向分力来表示。因此, 表面力可分解为:

$$\begin{cases} \vec{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \vec{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{cases} \quad (1-14)$$

$\vec{p}$ 称为面 $\vec{\tau}$ 积 ΔA 上的平均正应力或平均压强, $\vec{\tau}$ 称为面积 ΔA 上的平均切应力。如果令面积 ΔA 无限缩小至 A 点, 则可以得到 A 点的压强或法向应力或正应力、切应力。正应力和切应力的量纲均为 ML^{-1} 。在国际单位制中, 单位是帕斯卡, 以 Pa 表示。工程单位为 kgf/m^2 或 kgf/cm^2 。

表面张力就是液体表面的切向应力。

单位质量力是空间坐标 x, y, z 和时间的函数:

$$f = f(x, y, z)$$

是质量力在空间中的分布密度, 而 p 和切应力 τ 不仅有赖于空间和时间, 同时也与作用的方向有关, 因此被称为是作用面上的分布密度。

第四节 流体的力学模型

客观上存在的实际流体, 物质结构和物理性质是非常复杂的。在分析考虑流体力学问题时, 根据抓主要矛盾的观点, 建立力学模型, 对流体加以科学的抽象, 简化流体物质结构和物理性质, 以便列出流体运动规律的数学方程式。力学模型的概念具有普遍意义。下面介绍几个主要的流体力学模型。

首先, 将流体视为“连续介质”。不论是液体或气体, 总是由无数的分子所组成, 分子之间有一定的间隙, 也就是说, 流体实质上是不连续的。但是, 工程流体力学是研究宏观机械运动, 而不是研究微观的分子运动, 作为研究单元的质点, 也是由无数的分子所组成, 并具有一定的体积和质量。因此, 有可能将流体认为是充满其所占据空间无任何空隙的质点所组成的连续体。这种连续介质假设, 对流体物质结构的简化, 不考虑复杂的微观分子运动, 只考虑在外力作用下的宏观机械运动, 同时能够运用数学分析的连续函数工具, 求得合适的解。

其次是无黏流体。一切流体都是具有黏性的, 无黏流体的假设只适用于那些黏性不起作用或不起主要作用的场所。这种不考虑黏性的流体, 称为无黏性流体, 或理想流体。如果要某些问题中, 黏性影响较大而不能忽略时, 经常采用“两步走”的办法, 先当作无黏性流体分析, 得出主要结论, 然后采用试验的方法考虑黏性的影响, 加以补充或修正。这种考虑黏

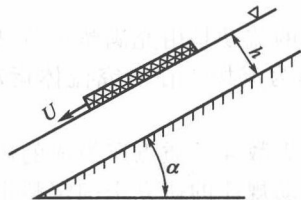
性的实际流体，也称为黏性流体。

再次是不可压缩流体。这是不考虑流体压缩性和热胀性的简化，其密度往往可视为不变的常数。气体在大多数流动情况下，也可采用不可压缩流体模型。只有在某些情况，例如速度接近或超过音速时，管路发生水击时，才必须用可压缩流体模型。本课程主要讲座不可压缩流体。

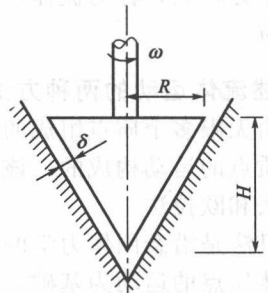
以上 3 个是流体力学的主要力学模型，以后在具体分析问题，还要提出一些模型。

习 题

- 1-1 何谓流体？流体与固体的主要区别是什么？
- 1-2 液体与气体的主要区别是什么？
- 1-3 何谓流体的连续介质模型？引入连续介质假设有何实际意义？
- 1-4 仍谓流体的黏性？黏性对流体运动有何影响？
- 1-5 为什么说流体黏性引起的摩擦力是内摩擦力？它跟固体运动的摩擦力有何不同？
- 1-6 为什么液体的动力黏度随着温度的升高而减小，而气体的动力黏度都随着温度的升高而增大？
- 1-7 在 20℃ 时，空气的运动黏度 ($15.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 比水的运动黏度 ($1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 大十几倍，故空气的黏性比水的黏性大，对吗？为何？
- 1-8 牛顿内摩擦定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 可适用于所有的运动流体吗？为什么说速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 实质上为流体微团做剪切变形速度？
- 1-9 何谓理想流体？自然界存在理想流体吗？
- 1-10 工程流体力学或水力学主要研究什么性质的流体？
- 1-11 水的容重 $\gamma = 9.71 \text{ kN/m}^3$ ， $\mu = 0.599 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，求它的运动黏滞系数。
- 1-12 有 20℃ 的水 ($\rho_{20} = 998.23 \text{ kg/m}^3$) 2.5 m^3 ，当温度升至 80℃ ($\rho_{80} = 971.83 \text{ kg/m}^3$) 时。其体积将增加多少？
- 1-13 有一矩形断面的宽渠道，其水流速度分布为 $u = 0.002 \frac{\rho g}{\mu} \left(hy - \frac{1}{2} y^2 \right)$ ，式中 ρ 、 μ 分别为流体的密度和动力黏度， g 为重力加速度， h 为水深。试求 $h = 0.5 \text{ m}$ 时渠底 ($y = 0$) 处的切应力 τ 。
- 1-14 如图所示，底面积 $A = 0.2 \text{ m}^2$ 、质量 $m = 5 \text{ kg}$ 木板，沿着涂有润滑油的斜面 ($\alpha = 30^\circ$) 等速下滑。已知木板下滑的速度 $U = 1.0 \text{ m/s}$ ，油层厚度 $h = 1 \text{ mm}$ ，试求润滑油的动力黏度系数 μ 。
- 1-15 如图所示，锥体绕其中心轴以 $\omega = 16 \text{ rad/s}$ 的角速度旋转。已知锥体半径 $R = 0.3 \text{ m}$ ，锥体高 $H = 0.5 \text{ m}$ ，锥体与锥腔之间的间隙 $\delta = 1 \text{ mm}$ ，间隙内润滑油的动力黏度 $\mu = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，试求使锥体旋转所需的力矩 M 。



题 1-14 图



题 1-15 图

- 1-16 两个圆桶同心的套在一起，其长度为 300mm，内桶直径为 200mm，两桶间充满密度为 900 kg/m^3 ，运动黏性系数 $\nu = 0.260 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 的液体，现内桶以角速度 $\omega = 10 \text{ rad/s}$ 转动，求转动时所需要的转矩。

第三章 流体动力学基础及一元流动



知识点

流体运动的两种方法，运动概念，连续性方程，伯努利方程，动量方程，水头线。



能力目标

掌握：描述流体运动的基本概念。连续性方程。测压管水头线及总水头线绘制。能量方程的物理意义、几何意义和各种应用。气流能量方程和动量方程式。应用基本概念解释工程中遇到的问题。应用连续性方程解决工程实际中遇到的问题。应用总流能量方程解决工程实际中遇到的问题。绘制给定问题的总水头线和测压管水头线。能应用气流能量方程解决工程实际中遇到的问题。

理解：加速度推导；连续性方程推导过程；总流能量方程推导过程；气流能量方程推导过程；动量方程推导过程。

第一节 流动描述

在流体静力学中，学习了流体在静止状态下的受力平衡规律，然而流动性是流体的最基本特性，在自然界和工程实际中，流体大多处于运动状态，因此研究流体的运动规律具有更重要和普遍的意义。由于流体易于变形，流体的运动比起离散的质点系或固体的运动来要复杂，怎样来描述复杂的流体运动，成为研究流体运动规律和动力学的首要问题。

流体动力学就是研究流体运动规律及其在工程上的实际应用的科学。本章研究流体的运动要素——压强、密度、速度、作用力、加速度间的相互关系；并根据流体运动实际情况，研究反映流体运动基本规律的3个方程式，即：流体的连续性方程式、能量方程式和动量方程式。这3个方程式，称为流体动力学三大基本方程式，它们在整个工程流体力学中占有非常重要的地位。

一、描述流体运动的两种方法

流体是由无限多个质点组成的连续介质，因此，流体的流动是由充满整个流动空间的无限多个流体质点的运动构成的，该充满运动流体的空间称为流场。在研究流体运动规律时，有拉格朗日法和欧拉法。

按格朗日法是沿袭固体力学的方法，把流体看作是由无数连续质点所组成的质点系，以研究个别流体质点的运动为基础，通过对每个流体质点运动规律的研究来确定整个流体的运动规律，这种方法称为拉格朗日法。

这种方法和离散质点系运动的描述方法实质上是一样的，只是由于流体团含有无穷多个连续分布的流体质点，已不能再沿用给质点编号的办法来区分它们，因此要想跟踪某个确定的流体质点的运动，就必须找到一个表征这个质点的办法，以使它和其他的质点区分开来。通常用流体质点在初始时刻 $t=t_0$ 的空间位置坐标 (a, b, c) 取不同的值表示不同的流体质