



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

LIUTI LIXUE BENG YU FENGJI

流体力学 泵与风机

张燕侠 主编
黄蔚雯 副主编

Thermal Energy & Power



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

LIUTI LIXUE BENG YU FENGJI
流体力学 泵与风机

10-1 泵与风机检修中常用精密量工器具有哪些?
10-2 什么是转子的晃度? 怎样测量转子的晃度?
10-9 简述联轴器的类型
10-10 主编 张燕侠
10-11 副主编 黄蔚雯
10-12 编写 王祥薇 何鹏
10-14 主审 张天孙 吕玉坤

10-16 简述多级泵的泵壳
10-19 简述泵平衡装置
10-20 简述离心泵的叶轮
10-21 简述离心泵的轴封
10-22 在离心泵叶轮中转子叶片的作用
10-23 叙述风机的主要性能参数
10-24 简述轴流式风机的叶片与叶轮的主要结构及其达到的目的

中国电力出版社发行

10-1 某轴流式风机的性能参数表

值	单位
25.0	2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷
15.0	787毫米×1092毫米 16开本 18印张 0.43千字
05.0	8 印数 0001—3000册 定价 28.80元
05.0	9 定价 28.80元

中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专）。

全书分为上、下两篇，上篇为流体力学，下篇为泵与风机。流体力学主要包括流体及其物理性质；流体静力学；流体动力学；流动阻力及能量损失；管道的水力计算，绕流物体的阻力和升力等；泵与风机主要包括泵与风机的分类与构造，泵与风机的叶轮理论、工作性能、运行调节和维护，泵与风机的检修，发电厂常用泵与风机等。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，适用于高职高专院校热能动力类专业和电厂集控运行专业，可用于电厂集控运行岗位、热力设备运行及检修岗位的技术培训，也可供相关专业技术人员学习与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学 泵与风机/张燕侠主编. —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. 高职高专教育

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5866 - 6

I. 流… II. 张… III. ①流体力学—高等学校: 技术学校—教材②泵—高等学校: 技术学校—教材③鼓风机—高等学校: 技术学校—教材 IV. 035 TH3 TH44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100950 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 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 438 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.80 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

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程教学大纲编写而成的。

本书充分体现高等职业教育特色,全面贯彻以素质教育为基础,强化技能培养的教学思想,紧密结合电厂集控运行、热力设备运行及检修岗位实际,注重基本概念、基本理论及其应用,加强针对性和实用性,突出现代大型泵与风机的新技术、新工艺。本书删除了与高职高专培养目标不相符合且与工程热力学课程重复的部分教学内容,如速度环量和旋涡强度、速度势和流函数及气体流动基础等;增加了与工程实际密切相关的教学内容,如泵与风机的启停、运行维护和事故处理以及泵与风机的检修工艺等。在章节的编排上,本书对教学内容进行了系统整合,如边界层属于绕流物体的流体运动问题,故将其并入绕流物体的阻力和升力一节,放在第四章流动阻力及能量损失中;把泵与风机在选型和运行中的扬程(全压)的确定、功率和效率的计算,并入第五章第二节泵与风机主要性能参数中,在以后章节中不再重复;把相似定律及其应用和泵内的汽蚀并入第七章泵与风机的性能中。这样,既符合循序渐进的教学规律,又使教材内容更加精炼。该教材图文并茂,深入浅出,通俗易懂。各章前有内容提要,每一节前有教学目的,章后有小结、复习思考题和习题,便于学习掌握。

本书由安徽电气工程职业技术学院张燕侠主编,并编写绪论和第四、六、七、八章;安徽电气工程职业技术学院黄蔚雯副主编,并编写第一、二、三章;安徽电气工程职业技术学院王祥薇编写第五、九章;安徽电气工程职业技术学院何鹏编写第十章。全书由华北电力大学吕玉坤和武汉电力职业技术学院张良瑜主审。

本书在编写过程中,得到有关科研院所、发电企业等单位的大力协助,得到有关院校领导、教师的支持和帮助,在此谨致谢意。

“流体力学 泵与风机”为安徽省精品课程,多媒体教学课件及相关教学材料的获取请登录 <http://www.aepu.com.cn>。

由于编者水平所限,对于书中存在的缺点和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2007年3月

目 录

前言	
绪论	1
小结	4
思考题	4
上 篇 流 体 力 学	
第一章 流体及其物理性质	5
第一节 流体的特征和连续性介质假设	5
第二节 流体的基本物理性质	6
第三节 作用在流体上的力	13
小结	14
思考题	15
习题	15
第二章 流体静力学	17
第一节 流体静压强及其特性	17
第二节 流体压强的表示方法	18
第三节 流体静力学基本方程	21
第四节 流体静力学基本方程的应用	24
第五节 静止液体作用在壁面上的总压力	32
小结	39
思考题	40
习题	41
第三章 流体动力学	44
第一节 流体运动的基本概念	44
第二节 一维管流的连续性方程	49
第三节 伯努利方程及其应用	51
第四节 动量方程及其应用	61
第五节 水击现象及其预防	66
小结	69
思考题	71
习题	72
第四章 流动阻力及能量损失	76
第一节 流体流动阻力及其分类	76

第二节	流体流动的两种状态	77
第三节	圆管中流体的层流与紊流	81
第四节	流动阻力损失的计算	84
第五节	减少流动阻力损失的途径	93
第六节	管道的水力计算	96
第七节	绕流物体的阻力和升力	102
小结		106
思考题		108
习题		109

下篇 泵 与 风 机

第五章	泵与风机分类和构造	112
第一节	泵与风机的分类	112
第二节	泵与风机的主要性能参数	117
第三节	离心式泵与风机的构造	122
第四节	轴流式(混流式)泵与风机的构造	138
小结		142
思考题		144
习题		144
第六章	叶片式泵与风机的叶轮理论	146
第一节	离心式泵与风机的叶轮理论	146
第二节	轴流式泵与风机的叶轮理论	157
小结		162
思考题		164
习题		165
第七章	叶片式泵与风机的性能	166
第一节	泵与风机的损失与效率	166
第二节	泵与风机的性能曲线	170
第三节	泵与风机的相似定律及其应用	178
第四节	泵内汽蚀	189
小结		198
思考题		200
习题		201
第八章	泵与风机的运行	203
第一节	泵与风机的工作点及运行稳定性	203
第二节	泵与风机的联合工作	206
第三节	泵与风机的运行工况调节	209
第四节	泵与风机的运行及维护	218

小结	223
思考题	224
习题	225
第九章 发电厂常用泵与风机	227
第一节 发电厂常用泵	227
第二节 发电厂常用风机	237
小结	242
思考题	243
第十章 泵与风机的检修	245
第一节 常用检修工器具	245
第二节 转子部件的检修基础工艺	248
第三节 泵的检修	263
第四节 风机的检修	272
小结	277
思考题	279
习题	279
参考文献	280

绪 论

内 容 提 要

本章主要讲述本课程的研究对象及其发展概况, 阐述流体力学及泵与风机在国民经济和热力发电厂中的地位和作用。

教学目的

熟悉本课程的研究对象, 了解流体力学及泵与风机的发展概况, 以及泵与风机在国民经济和热力发电厂中的地位和作用。

教学内容

一、本课程的研究对象和任务

本课程分为两篇, 上篇是流体力学, 下篇是泵与风机。

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律及其在工程实际中应用的一门技术学科。其内容主要包括流体静力学和流体动力学, 前者研究静止流体中的压强分布规律, 以及流体对固体壁面的压力等问题; 后者则研究运动流体的参数变化规律及其与固体边界的相互作用等问题。

泵与风机是提高流体能量并输送流体的机械。从能量意义上讲, 泵与风机其实是一种能量的转换设备, 它将原动机的机械能或其他形式的能量转化为流体的机械能。通常, 把输送液体的称为泵, 输送气体的称为风机。

泵与风机主要研究泵与风机的构造、原理、性能、运行维护及检修工艺等基本理论和基本方法, 还介绍热力发电厂中常用泵与风机的结构及性能特点。

学习本课程应注重基本概念、基本理论和基本方法的掌握和应用: 能合理解释现实生活 and 工程实际中的流体力学现象, 定性分析和定量计算相关的流体力学问题; 熟悉泵与风机的构造, 掌握泵与风机的工作原理和性能, 结合泵与风机的运行和检修实训, 初步掌握泵与风机基本运行知识及检修工艺。

二、流体力学泵与风机在国民经济中的地位

流体力学是一门应用性很强的技术学科, 涉及到国民经济的各个领域。它不仅应用于航空、航天、海洋、水利等方面, 而且还应用于能源、环保、化工等领域。例如: 研究大气和海洋的运动, 可以作好天气与海情预报, 为农业、渔业、航空、航海、国防和人民生活服务; 研究流体中运动的物体, 可设计出阻力小、稳定性好的最佳物体外形, 如汽车、飞机、人造卫星、导弹、船舶、潜艇、鱼雷等; 研究河流、管道等约束边界中流体的运动规律, 可获得能耗少、安全性高的工程设计, 如水利枢纽工程、水力发电厂、热力发电厂等。流体力学也应用于医学领域, 人体的循环系统也是流体系统, 因此, 像人工心脏、心肺机、助呼吸器等医疗器械的设计也依赖于流体力学。

泵与风机是国民经济各部门中广泛应用的通用机械。例如, 航空航天事业中的卫星上天、火箭升空, 农业生产中的排涝、灌溉, 工业生产中石油、水、高温及腐蚀性介质等流体的输送和排放, 人们生活中的给水、排水、通风、采暖等, 都离不开泵与风机。据统计, 在

全国的总用电量中,约有30%的电量是泵与风机耗用的,其中泵的耗电约占21%。

三、泵与风机在热力发电厂中的作用

热力发电厂都是以水、蒸汽或烟气等流体作为工作介质,通过某种热力循环,由热功转换获得电能。图0-1所示为热力发电厂系统简图,其主要组成设备是锅炉、汽轮机、发电机、凝汽器和水泵。在锅炉中,燃料燃烧发出的热量将给水定压加热成过热蒸汽,从而将燃料的化学能转变成蒸汽的热能。通过汽轮机,将过热蒸汽携带的热能转变成机械能,带动发电机旋转,进而将机械能转变成电能。做过功的乏汽在凝汽器中放热凝结成水,由凝结水泵经低压加热器送入除氧器。除氧器除过氧的水再通过前置泵、给水泵升压后,经高压加热器送入锅炉重新加热。

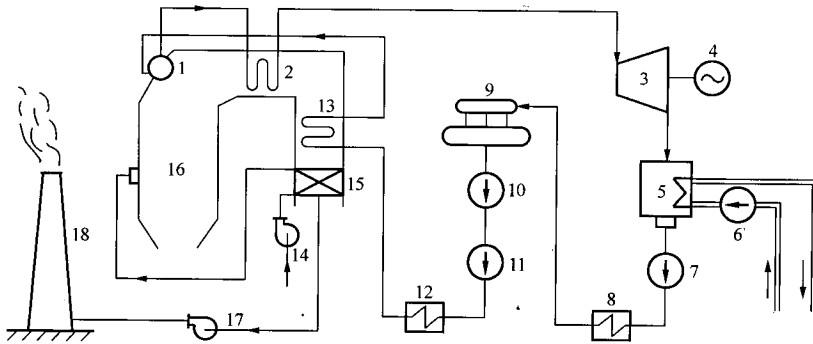


图0-1 热力发电厂系统简图

- 1—汽包; 2—过热器; 3—汽轮机; 4—发电机; 5—凝汽器; 6—循环水泵; 7—凝结水泵;
8—低压加热器; 9—除氧器; 10—前置泵; 11—给水泵; 12—高压加热器; 13—省
煤器; 14—送风机; 15—空气预热器; 16—炉膛; 17—引风机; 18—烟囱

在热力发电厂中,用泵输送的介质还有冷却水、润滑油和灰渣水等。向凝汽器输送冷却水的,有循环水泵;排送热力系统中各处疏水的,有疏水泵;为了补充管路系统的汽水损失,又设有补充水泵;为排除锅炉燃烧后的灰渣,设有灰渣泵和冲灰水泵;另外,还有供汽轮机、泵与风机等运转设备各轴承润滑油的润滑油泵,以及供轴承和各设备冷却用水的工业水泵等。根据工作条件的差异,对泵的要求也不相同,如给水泵需要输送压强为几个甚至几十兆帕、温度可高达 200°C 以上的高温给水;循环水泵要输送每小时高达几万吨的大流量冷却水;灰渣泵则要输送含有固体颗粒的流体。用风机输送的介质有空气、烟气、煤粉与空气的混合物等。为输送炉膛燃烧所需要的煤粉和空气,设有送风机、排粉风机;为排除锅炉燃烧后的烟气,设有引风机。不同的风机,其工作条件也有较大差异,如引风机要输送 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的高温烟气,排粉风机则要输送含有固体颗粒的流体。

泵与风机正常运行与否,直接影响着热力发电厂的安全经济运行。泵与风机发生故障,就有可能引起停机、停炉等重大事故,造成巨大的经济损失。如现代大型汽包锅炉的容量大,而汽包的水容积相对较小,如果锅炉给水泵发生故障而中断给水,则汽包在极短的时间内“干锅”,导致停炉、停机。

由此可见,在整个热力发电厂生产过程中,完成热功转换和能量传递的中间介质是流体,输送流体的是泵与风机,因此,对热力发电厂而言,流体是“血液”,泵与风机就是“心脏”。

四、流体力学泵与风机的发展概况

1. 流体力学的发展概况

早在公元前 20 世纪,人们就在灌溉、供水、航运中积累了丰富的水力学知识。大约在公元前 205 年,阿基米德揭示了“浮力”定律,成为流体力学研究的起源。

文艺复兴时期,著名的艺术家和物理学家达·芬奇系统地研究过物体的沉浮和运动阻力,以及流体在管道和水渠中的流动等问题,还发明了离心抽水机。

公元 16 至 17 世纪,众多科学家建立了流体静力学的基础理论。1586 年,斯蒂芬建立了液体压强和连通器定律,解释了“静水奇象”。1612 年,伽利略建立了沉浮的基本理论。1643 年,托里拆利发明了水银气压计,论证了孔口出流的基本规律。1650 年,帕斯卡证明了流体中压强传递定理。1686 年,牛顿建立了流体内摩擦定律。

流体力学成为一门独立的学科,始于 18 世纪。自那时起,大批科学家对流体力学作出了卓越的贡献。伯努利通过大量的实验和理论推导,总结出流体流动过程中的能量转换关系,即著名的伯努利方程。达朗贝尔根据质量守恒定律,提出了流体流动的连续性方程;欧拉导出了描述流体运动的欧拉方程;拉格朗日发展了欧拉理论;纳维尔和斯托克斯推出了黏性流体的运动微分方程。

19 世纪末,英国物理学家雷诺通过大量的实验研究,提出了流体流动两种状态——层流和紊流,并找出了判别这两种流动状态的重要参数——雷诺数。1904 年,普朗特提出了边界层理论,对黏性流体力学的建立起了很大的作用。茹可夫斯基创立了机翼升力理论,对螺旋桨和机翼的研究作出了杰出的贡献。20 世纪初,紊流理论、可压缩流体运动理论、高速空气动力学的研究取得了巨大成就。20 世纪 50 年代以后,随着宇宙航行、原子能工业的发展,稀薄动力气体学、电磁流体力学也成为新的流体力学分支。近年来,由于高分子材料、生态环境保护等学科的发展,非牛顿流体力学、多相流体力学、生物流体力学、气动噪声流体力学也在创立和发展中。

2. 泵与风机的发展概况

泵与风机是应用比较早的机械之一。在古代,为适应农业灌溉和冶炼的需要,人类就制造了简单的提水工具和鼓风工具,成为泵与风机的雏形。18 世纪,由于往复式蒸汽机的发明,往复式泵与风机也随之出现;之后,又发明了离心式和轴流式泵与风机。到 19 世纪末,由于电动机的发明,泵与风机得到了广泛的应用。

随着现代科学技术的不断发展,近年来,泵与风机正向着大容量、高参数、高转速、高效率、高度自动化和高可靠性的方面发展。

(1) 大容量、高参数。随着热力发电厂单元机组容量的增大和参数的提高,锅炉给水泵的容量和参数迅速增加。20 世纪 50 年代,50MW 发电机组被看做是一个重大的技术成就,而今天,这一动力只能用来驱动一台 1300MW 大型机组的给水泵。国产 300MW 机组配套的两台锅炉给水泵,每台驱动功率为 5500kW,1800MW 机组给水泵的驱动功率 55000kW,甚至还有驱动功率高达 75000kW 的给水泵。给水泵的出口压力也从超高压 13.7~15.7MPa、亚临界压力 17.7~20MPa,发展到超临界压力 25.6~31.5MPa。随着高效超临界压力机组的发展,将会有出口压力高达 50MPa 以上的给水泵问世。在热力发电厂中,虽然对风机的风压要求不是很高,但要求的流量随着机组容量的增大而迅速增加,而大功率的高效动叶可调轴流式风机正满足了这一需求。目前,300MW 及其以上容量机组的送风机普

遍采用了动叶可调轴流式风机，国外有 700MW 机组配用的轴流式送风机和引风机的驱动功率为 11000kW。

(2) 高转速。随着给水泵的容量和参数迅速增加，给水泵转速也越来越高，这是因为提高泵单级扬程的高效方法是提高转速。在总扬程相同的情况下，提高转速可达到减小泵的级数、缩短泵轴、减小体积、减轻重量、节省材料的目的。如美国 660MW 机组配套的给水泵，转速由原来的 3000r/min 提高到 7500r/min，单级扬程可达 1143m，级数从 5 级减少到 2 级，重量减少了 3/4，经济效益十分显著。

(3) 高效率。从发电厂看，泵与风机耗电量占全部厂用电量的 70%~80%，其中泵约占 50%，风机约占 30%。因此，泵与风机的高效运行直接影响着发电厂的成本。近年来，我国在泵与风机的节能降耗方面做了大量工作，对效率低于 60% 的泵及效率低于 70% 的风机进行技术更新、改造，使给水泵的效率达 80%，引风机效率高于 90%。我国还从美国、德国等先进国家引进高压锅炉给水泵生产技术，其效率均在 82% 以上。

(4) 高度自动化。随着计算机技术的发展与应用，在泵与风机运行中实现了自动启停，流量、压力、温度等参数的实时检测、显示和控制，以及在线故障诊断、自动连锁和保护。

(5) 高可靠性。由于泵与风机向大容量、高速化方向发展，因此对其可靠性要求越来越高，特别是在泵的汽蚀、磨损、密封、振动等方面的安全可靠性能有更为严格的要求。对大型风机也要做超速、振动、临界转速和谐振转速等试验，以保证其安全可靠运行。

小 结

1. 本课程的研究对象

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律及其在工程实践中应用的一门技术学科，其内容包括流体静力学和流体动力学。

泵与风机是将原动机的机械能转换成流体的机械能并输送流体的动力设备。通常，把输送液体的称为泵，输送气体的称为风机。

2. 泵与风机的地位和作用

流体力学泵与风机涉及国民经济的各个领域，在国民经济建设中占有重要的地位。在热力发电厂中，流体是“血液”，泵与风机就是“心脏”。

3. 流体力学泵与风机的发展概况

流体力学经过 2000 多年来大批科学家的共同努力已成为多分支、多门类的技术学科。

泵与风机正向着大容量、高参数、高转速、高效率、高度自动化和高可靠性的方向迅速发展。

思 考 题

- 1-1 本课程的研究对象是什么？
- 1-2 简述热力发电厂中的热力循环过程，其工作介质有哪些？
- 1-3 热力发电厂中主要有哪些泵与风机？
- 1-4 泵与风机的发展趋势是什么？

上篇 流 体 力 学

第一章 流体及其物理性质

内 容 提 要

本章着重阐述流体的主要物理性质，特别是流体的黏性；引入连续性介质、不可压缩流体和理想流体等假设，简单介绍作用在流体上的力。

第一节 流体的特征和连续性介质假设

教学目的

掌握流体的定义、主要特征，明确液体与气体的主要区别，深刻理解连续性介质的假设。

教学内容

一、流体及其特征

在地球上，物质存在的主要形式有固体、液体和气体。通常说，能流动的物质为流体。液体和气体易流动，我们把液体和气体称为流体。

但这样说不严格，应该用力学语言来描述。日常生活中我们注意到，物体受到切向力作用时，会产生两种不同特性的基本变形。一种是在一定力的作用下，只会产生一定程度的变形。其特性是作用力不变，变形也不变。施力对固体所产生的变形，就具有这一特性。另一种是在任何微小的切向力作用下，就会产生持续不断的变形。其特性是只要切向力存在，不论其大小如何、变化与否，变形就会继续，直到切向力消失为止。这就是流体的变形特征。因此，力学语言对流体的定义是：在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质。这种连续变形的特性叫做流动性。液体流向低处，烟囱排出的烟气在微风作用下飘荡不息等自然现象，就是液体和气体流动性的体现。

正是由于流体的流动性，流体没有固定的形状，其形状取决于容器的形状。因此，流体便于用管道输送，适宜于做供热、制冷等工作介质。流体不能承受拉力，只能承受压力。蒸汽推动汽轮机组发电，各种液压、气压传动机械等，都是流体抗压能力的应用。

液体和气体除具有上述共同特性外，由于它们分子间距的差异，还具有以下不同特性。

液体很难被压缩。这是由于液体分子间距较小，分子间的吸引力较大的缘故。也正因为这个原因，一定重量的液体具有一定的体积，并且由于分子间吸引力的作用，液体有力求自身表面积收缩到最小的特性。所以，当容器的容积大于液体的体积时，液体不能充满容器，故在重力的作用下，液体总保持一个自由表面（或称自由液面）。

气体具有很大的压缩性。这是由于气体分子间距较大，分子间的吸引力较小的缘故。气

体的分子间距与分子平均直径相比很大,以致分子间的吸引力微小,分子热运动起决定性作用,所以气体没有一定形状,也没有一定的体积,它总是能均匀充满容纳它的容器。

二、连续性介质假设

从微观角度看,流体是由大量做无规则运动的分子组成的,分子之间存在空隙,但在标准状况下, 1cm^3 液体中含有 3.3×10^{22} 个左右的分子,相邻分子间的距离约为 $3.1 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。 1cm^3 气体中含有 2.7×10^{19} 个左右的分子,相邻分子间的距离约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。流体力学所研究的不是个别分子微观运动,而是流体的宏观特性,在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间,都比分子距离和分子碰撞时间大得多。

所以,在流体力学中,通常取流体微团来作为研究流体的基元。所谓流体微团是一块体积为无穷小却含有大量分子的微量流体,由于流体微团的尺寸极其微小且含有大量分子,从宏观角度看,可以忽略流体分子间的间隙,将流体可看成是由无限多连续分布的流体微团组成的连续性介质。

当把流体看作是连续性介质后,表征流体性质的密度、速度、压强和温度等物理量在流体中也应该是连续分布的。这样,可将流体的各物理量看作是空间坐标和时间的连续函数,从而可以引用连续函数的解析方法等数学工具来研究流体的平衡和运动规律。本课程所研究的流体,就是这种具有流动性的连续性介质。

连续性介质实际上是在研究流体的平衡和运动规律时,为简化工程实际问题而引入的流体力学模型。影响流体机械运动规律的因素很多,也很复杂,但是在不同的运动中,并不是每个因素都具有同等的影响程度。因此,在研究复杂的实际流动现象时,为简化问题,首先忽略一些次要的或造成问题难以解决的因素,引入一些假设,如在以后章节中提到的不可压缩流体、理想流体、理想叶轮等,通过对这些假想模型的理论研究,找出流体运动的规律后,再根据实际因素进行补充和修正,最终得到实际流体的运动规律。这是研究流体力学泵与风机工程实际应用时常用的方法。

第二节 流体的基本物理性质

教学目的

掌握流体的内摩擦力(黏性力)、黏性与黏度的概念;掌握牛顿内摩擦力定律及在工程中的应用。掌握理想流体与黏性流体、不可压缩流体与可压缩流体、牛顿流体与非牛顿流体的概念;了解表面张力及毛细现象。

教学内容

在流体的平衡和宏观运动中,外界条件总是通过流体自身的内在物理性质起作用。因此,研究流体的宏观机械运动规律,首先要了解流体本身的基本物理性质。

一、惯性

惯性是物体反抗外力作用而维持其原有运动状态的性质。惯性的大小取决于物体的质量,质量大则惯性大。

工程中常用体积来表示流体量的多少,如煤气表、水表的示数都是体积。单位体积流体的质量称为流体的密度,用 ρ 来表示。

对于均质流体
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

不同种类流体的密度不同, 几种常见流体的密度见表 1-1。

表 1-1 常用流体的密度 (压强为 1atm)

流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)
汽油	15	730~755	纯水	4	1000
柴油	20	840~900	水银	0	13600
润滑油	15	890~920	空气	0	1.293
酒精	20	789	二氧化碳	20	1.84
四氯化碳	20	1588	饱和水蒸气	20	0.747

同一种流体的密度又随其温度和压强的变化而变化。水的密度变化可以通过“未饱和水与过热蒸汽表”查得, 而气体的密度变化, 可用完全气体 (工程热力学中为理想气体) 的状态方程来确定, 即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压强, Pa;
 ρ ——气体的密度, kg/m³;
 T ——热力学温度, K;
 R ——气体常数, J/(kg·K)。

或

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \quad (1-3)$$

式中 p_1 、 T_1 、 ρ_1 和 p_2 、 T_2 、 ρ_2 ——气体状态变化前、后的压强、温度及密度。

【例 1-1】 已知一个大气压下, 0°C 时的空气密度为 1.293 kg/m³, 求 300°C 的热空气密度为多少?

解 由式 $\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}$ 可知, 当压强不变时, 密度与温度成反比, 即 $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$
 依题意, 已知 $\rho_1 = 1.293 \text{ kg/m}^3$, $T_1 = 273 \text{ K}$, $T_2 = 273 + 300 = 573 \text{ K}$, 代入得

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{T_1}{T_2} = 1.293 \times \frac{273}{573} = 0.616 (\text{kg/m}^3)$$

二、压缩性和膨胀性

1. 压缩性

流体的压缩性是指温度一定时其体积随压强增加而缩小的性质。

流体压缩性的大小用压缩率 β_p 来表示。它表示当温度保持不变时, 单位压强增量引起流体体积的相对缩小量, 即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-4)$$

式中 β_p ——流体的压缩率, m^2/N ;
 dp ——流体压强的增加量, Pa ;
 V ——流体的原有体积, m^3 ;
 dV ——流体体积的缩小量, m^3 。

由于压强增加时, 流体的体积减小, 即 dp 与 dV 的变化方向相反, 故在上式中加个负号, 以使压缩率 β_p 为正值。

压缩率 β_p 的倒数就是弹性系数 E_0 , 即

$$E_0 = \frac{1}{\beta_p} = -dp \frac{V}{dV}$$

液体的压缩率很小。例如水在压强 $9.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 下, 温度在 4°C 范围内, 水的 $\beta_p = 5.31 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{N}$; 反过来说, 液体的弹性系数值却很大, 水的弹性系数 $E_0 = \frac{1}{\beta_p} \approx 2.0 \times 10^9 \text{N}/\text{m}^2$ 。可见, 当液体的压强变化很大时, 其体积的变化却很小, 所以, 我们一般不考虑液体压强变化引起的体积变化。而气体的压缩性要比液体的压缩性大得多。

2. 膨胀性

流体的膨胀性是指压强一定时其体积随温度升高而增大的性质。

流体膨胀性的大小用体胀系数 β_T 来表示, 它表示当压强不变时, 升高一个单位温度所引起流体体积的相对增加量, 即

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1-5)$$

式中 β_T ——流体的体胀系数, $1/^\circ\text{C}$ 或 $1/\text{K}$;
 dt ——流体温度的增加量, $^\circ\text{C}$ 或 K ;
 V ——原有流体的体积, m^3 ;
 dV ——流体体积的增加量, m^3 。

流体体胀系数 β_T 与压强和温度有关。对于大多数液体, β_T 随压强的增加而减小, β_T 随温度的增加稍为增大。但液体的体胀系数 β_T 很小, 例如在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 压强下, 温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内, 水的 $\beta_T = 14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$; 在 $9.8 \times 10^5 \text{Pa}$ 压强下, 温度在 $60 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内, 水的 $\beta_T = 548 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。

3. 不可压缩流体假设

流体的压缩性和膨胀性是其密度随压强和温度的改变而变化的原因。通常情况下, 液体以及压强、温度变化很小且流速不高的气体, 其压缩性和膨胀性都很小, 常常可以忽略其压缩性和膨胀性, 将其密度视为常数。我们把密度可视为常数的流体叫做不可压缩流体。一般的液体及常温下流速小于 70m/s 或压强变化不大且小于 9807Pa 的气体, 都可以看作不可压缩流体。

在实际工程中, 是否考虑流体的压缩性, 要视具体情况而定。例如, 研究管道中水击和水下爆炸时, 水的压强变化较大, 而且变化过程非常迅速, 这时水的密度变化就不可忽略, 即此时要考虑水的压缩性, 把水当作可压缩流体来处理。又如, 在锅炉尾部烟道和通风管道中, 气体在整个流动过程中, 压强和温度的变化都很小, 其密度变化很小, 可作为不可压缩流体处理。

【例 1-2】 温度为 20°C ，体积流量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 的水流入加热器，经加热后，温度升为 80°C ，如果水的体胀系数 $\beta_T = 54 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ ，问水从加热器中流出时，体积流量变为多少？

解 由 $\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$ ，近似由 $\beta_T = \frac{1}{\Delta T} \frac{\Delta V}{V}$ 计算

则 $\Delta V = \beta_T \cdot \Delta t \cdot V = 54 \times 10^{-6} \times (80 - 20) \times 100 = 0.32(\text{m}^3/\text{h})$
 体积流量变为 $\Delta V + V = 100.32(\text{m}^3/\text{h})$

三、黏性

流体的黏性直观地表现为流体的黏稠程度。一般人说油比水黏稠，是由于油比水流动缓慢，即油比水表现出更强的阻止流动的趋势。

从力学角度看，固体在确定的剪切力的作用下产生固定的变形，流体在剪切力作用下产生连续的变形，即连续运动，但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形速度是不同的，它反映了抵抗剪切变形能力的差别，这种能力就是黏性。

1. 牛顿流体黏性实验

现通过实验来进一步说明流体的黏性。如图 1-1 所示，两间距很小的平行平板间充满流体（如油），下部平板固定（相当于容器底部），上部平板在力 F 的作用下作匀速直线运动，速度为 u_0 。

由于黏性，与下板接触的薄层流体静止， $u = 0$ ；与上板接触的薄层流体运动速度与板的速度相同 $u = u_0$ ，板间流体均作平行于板的运动，且其速度均匀地由下板的零变化到上板的 u_0 ，呈线性分布。各流层之间存在相对运动，因而必产生切向阻力 T 。

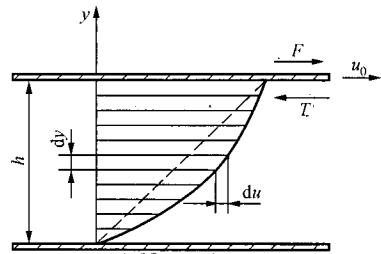


图 1-1 流体黏性实验

实验可归纳出如下结论：

(1) 两板之间的各流体薄层在上板的带动下，都作平行于平板的运动，其运动速度由上向下逐层递减。

(2) 当板间流体的流速呈线性变化时，流体微团在流速法线方向上的速度变化率为一定值 $\frac{u_0}{h}$ 。通常情况下，流体微团的速度并不按线性变化，此时流体微团在流速法线方向上的速度变化率为 $\frac{du}{dy}$ ，不再是定值。

(3) 由于各流层速度不同，流层间就有相对运动，运动速度小的流层对速度大的流层产生切向阻力 T ，称其为内摩擦力。内摩擦力又称为黏性力或黏滞力，它是流体在运动过程中产生能量损失的根本原因。

(4) 为保持流体作匀速运动，作用在平板上推动力 F 必与黏性力 T 大小相等、方向相反。

2. 牛顿内摩擦定律

英国科学家牛顿通过实验观察到运动的流体所产生的黏性力 T 的大小与上板的运动速度 u_0 成正比，与接触面的面积 A 成正比，与上下板的间距 h 成反比，并与流体的种类和温度有关，而与接触面上流体的压强 p 无关，即

$$T \propto A \frac{u_0}{h}$$

牛顿引入反映流体种类和温度的比例系数 μ ，并且考虑流体微团的速度不按线性变化，流体微团在流速法线方向变形速率（速度梯度）为 $\frac{du}{dy}$ 。因此由黏性而产生的内摩擦力为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (\text{N}) \quad (1-6)$$

式中 T ——流体层接触面上的内摩擦力，N；

A ——流体层间的接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ ——垂直于流动方向上的速度梯度， s^{-1} ；

μ ——动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

式 (1-6) 为牛顿内摩擦定律的数学表达式。

流层间单位面积上的内摩擦力称为切向应力（简称切应力），用 τ 表示，则

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{Pa}) \quad (1-7)$$

当流体处于静止状态或以相同速度运动（流层间没有相对运动）即 $\frac{du}{dy} = 0$ 时， $\tau = 0$ ，流体并不呈现出黏性，此时流体有黏性，但作用表现不出来。

3. 黏度

由式 (1-7) 可变换成

$$\mu = \left| \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \right| \quad (1-8)$$

可见， μ 值表示单位速度梯度时接触面上的切应力，它反映了流体黏性的强弱。同样速度梯度的条件下， μ 值愈大，说明 τ 愈大，流体的黏性愈强；反之，流体的黏性愈弱。 μ 值一般用黏度计测定。

动力黏度与密度的比值称为运动黏性系数或运动黏度，用符号 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中 ν ——表示运动黏度， m^2/s 。

如表 1-2 列出的就是水和空气在一个标准大气压下，不同温度时的 μ 值和 ν 值。

表 1-2 水和空气的 μ 值和 ν 值

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	水		空气	
	μ ($\times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	μ ($\times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)	ν ($\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
0	1788	1.792	17.16	13.70
10	1308	1.306	17.80	14.70
20	1002	1.003	18.08	15.70
30	801	0.805	18.73	16.61
40	653	0.658	19.20	17.60
50	547	0.553	19.60	18.60
60	470	0.478	20.10	19.60