



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

泵 与 风 机

电厂热力设备运行专业

主编 毛正孝



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

泵 与 风 机

电厂热力设备运行专业

主 编 毛正孝
责任主审 孙保民
审 稿 时芝平 吴民强



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本教材包括绪论、流体力学基础、泵与风机等三部分内容。绪论主要阐述本课程的性质及学习的目的和任务,介绍流体力学、泵与风机的发展概况。单元一流体力学基础着重介绍流体及其压力等基本概念,阐明液体机械运动的基本规律和液体管内流动、流体绕流物体以及作超音速流动时阻力损失的基本规律,并举例说明它们在生产实践中的应用。单元二泵与风机以叶片式泵与风机为主,介绍分类、型号、原理、基本性能参数等基本常识;以叶片式泵与风机纵剖面图、性能曲线及工作点为主线,阐述泵与风机各部件名称、作用等基本知识;阐明性能曲线的绘制、变换原理、意义和影响因素以及工作点意义与调节原理等基本理论知识;并以热力发电厂常用的泵与风机为例,综合阐述它们的作用、特点及其运行的基本知识。

本书系教育部规划的中等职业教育电力类重点建设专业“电厂热力设备运行”的主干专业课程教材,也可作为相近专业“流体力学、泵与风机”课程教材或教学参考书,以及热力发电厂有关生产人员职业技能培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

泵与风机/毛正孝主编. —北京:中国电力出版社,
2001

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-5083-0761-5

I. 泵… II. 毛… III. ①泵-专业学校-教材 ②鼓风机-专业学校-教材 IV. TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 066333 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

利森达印务有限公司印刷

*

2002 年 1 月第一版 2003 年 8 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 306 千字

印数 7001—10000 册 定价 16.50 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)

电力中等职业教育国家规划教材

编 委 会

主 任 张成杰

副主任 杨昌元 宗 健 朱良镭

秘书长 尚锦山 马家斌

委 员 丁 雁 王玉清 王宝贵 李志丽 杨卫民

杨元峰 何定焕 宋文复 林 东 欧晓东

胡亚东 柏吉宽 侯林军 袁建文 涂建华

梁宏蕴

中等职业教育国家规划教材

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成[2001]1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

《泵与风机》是教育部规划的中等电力职业学校重点建设专业“电厂热力设备运行”的主干课程教材，也是中等职业教育国家规划的一本教材。全书是依据中华人民共和国教育部职业教育与成人教育司 2000 年 9 月审定通过的“中等职业学校电厂热力设备运行专业教学改革整体方案”和教学计划，以及 2001 年 2 月审定通过的《泵与风机》教学大纲的要求进行编写的。

遵照教育部关于“面向 21 世纪职业教育课程改革和教材建设规划”的原则和基本思路，力求做到切实为实现培养高素质劳动者和中初级专门人才的目标服务，体现以能力为本位的新观念，注意培养学生综合职业能力、创新精神和实践能力，密切联系生产实际，反映电力生产技术领域的新知识、新科技。根据专业覆盖岗位（工种）所需的综合能力和素质要求，对内容进行了增删、分解和重组。在流体力学单元中，建立了以液体机械运动基本方程式和流体流动阻力或阻力损失计算公式为主线的“实用型”流体力学基础知识新体系；删去了与《热工基础》课程重复的或偏深、偏难的内容，例如气体流动基本方程式、环量与环流等；理清了压力、风压、压头、流动阻力及其损失等容易混淆的概念；以流动阻力损失为题重新组合流动阻力、水力计算及气体动力学基础的知识，较好地突破了长期存在的教学难点；新体系更加注重能头、能头线、稳定流、附面层、激波等基本概念的建立，重点阐明能量方程式与管内流动阻力损失等基本理论的表达形式、意义及适用条件；突出用公式进行定性分析或定量计算的基本技能训练，强调促进解决生产实际问题能力的形成。在泵与风机单元中，建立了以叶片式泵与风机结构剖面图、性能曲线和工作点为主线的“面线点型”内容新体系；删去了叶片式泵与风机基本方程式的推导过程、环流系数经验公式以及轴流式泵与风机的叶轮公式等偏深、偏多、偏难的内容；以性能曲线为题重新组合基本方程式、性能曲线、相似定律、无因次性能曲线和比转数等基本理论内容并新增 $[H_s] - q_v$ 和 $[\Delta h] - q_v$ 性能曲线，形成《泵与风机》的主干内容，突出了“面线点型”课程内容体系的主线，组成了相对独立、比较完整、比较系统的知识新模块；再加，将管道特性曲线、泵与风机的基本性能参数、性能曲线和工作点等重点和难点内容，按难点分散、循序渐进的教学原则，先后在不同的四个课题内阐述，从而使新体系不仅有利于学生掌握技能服务的应用性知识，也有利于提高学生的自学能力，增强开拓创新能力。此外，新体系还以现代热力发电厂常用泵与风机为例，另一方面注重培养学生掌握识读结构图、剖析结构特点、学习运行规程、分析判断运行工况等方面的基本技能；一方面向学生介绍泵与风机的新知识、新技术、新工艺和新方法。全书编写中强调理论与实践、知识与技能、实用性与科学性、针对性与先进性的紧密结合，注重定性分析，阐明物理意义和应用方法，简化某些论证和数学推导，努力做到通俗易懂、内容正确、深入浅出、易教易学。

在全书内容的编排、组合上,采用课题型模块结构。流体力学单元由“研究对象块”、“基本规律块”、“阻力损失块”三个模块组成;泵与风机单元由“常识块”、“结构块”、“性能曲线块”、“工作点块”及“综合应用块”五个模块组成。每个模块的内容都具有相对的完整性和独立性,并具有一定的可拆性。在使用时,可以在一定程度上灵活选用,迭加组成满足不同教学层次需要的各种泵与风机教材,以适应当前学校教育改革中,进行多层次多功能教学的需要。

本书还根据电力职业教育指导委员会的统一要求,做到各单元开始有内容提要,各课题开始有教学目的,各单元后面有小结和取材于工程实际的思考题、习题,可供教学中抓住重点、讲清难点参考,对学生预习、复习起着很好的指导作用。

本书绪论,单元一的课题一、课题二、课题三,单元二的课题一、课题三、课题四,以及两个单元小结的内容由山东省电力学校毛正孝副教授编写;单元二的课题二、课题五由四川电力职业技术学院戚戎高级工程师编写。全书由毛正孝副教授主编,由重庆高级电力技工学校敬勇高级讲师主审。

本书在编写过程中,得到了哈尔滨电力学校、重庆高级电力技工学校、兰州电力学校、保定电力学校、武汉电力学校、江西电力学校的热情支持,并得到了邹县发电厂、石横发电厂、聊城发电厂、靖远发电厂、平凉发电厂等有关单位和山东电力职工技能培训中心王焕金、郭广宏等同志的大力帮助;电力职业教育指导委员会动力类专业教研会王宝贵、宋文复、李志丽、侯林军、张劲松等专家领导,也先后对书稿提出了许多宝贵意见和建议,在此谨一并致以衷心的感谢。

限于编者水平以及编写时间短促,书中缺点和不足之处难免,恳切希望广大师生和读者批评指正。

编 者

2001年7月28日

目 录

中等职业教育国家规划教材出版说明

前言

绪论	1
思考题	3
单元一 流体力学基础	4
课题一 流体及其压力的概念	4
课题二 液体机械运动的基本规律	11
课题三 流体流动的阻力损失	38
小结	62
思考题	71
习题	75
单元二 泵与风机	85
课题一 泵与风机的基本常识	85
课题二 叶片式泵与风机的构造	97
课题三 叶片式泵与风机的性能曲线	111
课题四 叶片式泵与风机的工作点	138
课题五 火力发电厂常用泵与风机及其运行基本知识	159
小结	187
思考题	201
习题	204
参考文献	209

绪 论

内 容 提 要

阐明流体力学、泵与风机等概念；介绍流体力学、泵与风机在国民经济各行业，特别是在电力行业中的作用和地位以及古今中外的发展概况；说明本课程的性质及学习的目的和任务。

一、本课程的性质及学习的目的和任务

泵与风机是将原动机（如电动机、汽轮机等）提供的机械能转换成流体的机械能，以达到输送流体或造成流体循环流动等目的的机械。通常，把提高液体机械能的机械称为泵，把提高气体机械能的机械称为风机。

《泵与风机》是电厂热力设备运行专业的一门主干专业课程。全书共分两个单元，第一单元是流体力学基础，第二单元是泵与风机。流体力学是研究流体的机械运动规律及其在生产实践中应用的一门学科。其内容精深，应用广泛。本课程仅根据中等电力职业学校电厂热力设备运行专业培养目标的需要，研究流体力学的基础知识。主要内容是将以水为代表的不可压缩流体（简称液体）选作研究对象，介绍表示液体机械运动规律和流体流动阻力损失规律的各种数学公式；讨论这些公式的形式、意义及适用条件；研究它们在分析和解决工程实际问题中，使用的方法、步骤和注意事项。泵与风机部分的主要内容是结合火力发电厂常用的泵与风机，介绍泵与风机的分类构造、工作原理和基本性能参数等基本知识；着重讨论泵与风机性能曲线及其变换原理、工作点和调节原理等基本理论；研究泵与风机结构图的识读、性能曲线的分析比较和变换、工作点和调节方法的确定以及运行维护等基本应用知识。

流体和泵与风机是国民经济各个部门都广泛应用的工作介质和通用机械。例如，航空航天事业中的卫星上天、火箭升空和超音速飞机的翱翔蓝天；农业中的排涝、灌溉；石油工业中的输油和注水；化学工业中高温、腐蚀性流体的排送；其他工业和人们日常生活中的采暖、通风、给水、排水等都离不开流体和泵与风机。据统计，在全国的总用电量中，有 30% 左右是泵与风机耗用的，其中泵的耗电占 21% 左右。由此可见，流体和泵与风机在我国国民经济建设中所占的重要地位和作用。

热力发电厂更离不开流体和泵与风机。其电能的生产是依靠汽（气）、水、油等流体介质在泵与风机同其他热力设备用管道连接组成的系统（如热力系统和一些辅助生产系统）中流动，进而安全经济地实现热功的转换，为发电机提供足够的机械能，实现机械能与电能间的转换。

其中，各种类型的泵分别维持着系统中给水、凝结水、冷却水、疏水、润滑油等液体的流动，各种类型的风机则分别维持着空气、烟气、含煤粉空气等气体的流动，从而使泵

与风机成为系统中必不可少的重要辅助设备，它们的运行状况以及流体在系统内的流动正常与否都直接影响着发电厂生产的安全性和经济性。例如，向锅炉供水的给水泵突然发生故障或给水管道破裂发生严重泄漏，就会使锅炉缺水，甚至发生烧干锅炉而被迫停止发电的重大事故。又如一个 1000MW 的发电厂，一般厂用电占机组容量的 7%~10%，其中的 70%~80% 被泵与风机耗用（假定全部由电动机驱动），即消耗电量为 49~80MW。当流体在泵与风机内流动的阻力损失增大，或是泵与风机运行工况的况节不当时，又会使泵与风机的效率降低，耗电量增加。假如这些泵与风机的效率从 80% 降到 70%，则它们将多消耗 7~11.4MW 的电量。由此可见，减小流体在系统内的流动阻力损失，合理地调节运行工况，提高泵与风机的效率，降低耗电量，是减少厂用电、降低发电成本及提高电厂经济效益的关键之一。因此，从事电厂热力设备运行专业各工种的运行人员，必须具有流体力学和泵与风机知识，掌握流体在系统中的流动规律和泵与风机等热力设备的性能特点，在实践中不断提高自身运行分析和操作技能，这样才能确保系统及有关热力设备在安全经济的状态下运行。另外，本课程的内容也为学习《汽轮机设备》、《锅炉设备》、《热力设备试验》、《单元机组运行》、《热力发电厂》等后续课程提供了必备的基本理论知识。由此可知，对电厂热力设备专业的学生而言，学好本课程是极为重要的。

二、流体力学和泵与风机的发展概况

流体力学、泵与风机和其他学科一样，也是人类在生产实践过程中建立和发展起来的，今后还将随着生产力水平的提高而更加成熟和完善。

在古代，人类为了生存，在向洪水作斗争、向自然要动力的过程中，积累了丰富的实用水力学和简单流体机械的知识。例如我国公元前两千多年前的禹治水，春秋战国和秦朝时修建的都江堰、郑国堰和灵渠三大古老水利工程，隋朝时开通的闻名中外、全长为 1782km 的京杭大运河，在生产和生活中使用的戽斗、吊杆、辘轳、水车、风箱等简单流体机械，以及古希腊学者阿基米德在公元前 250 年撰写的《论浮体》论文都是古人在流体力学、泵与风机学科中留下的宝贵历史遗产。

但是，流体力学作为一门独立的学科是从 18 世纪开始的，经过欧拉、伯努利、拉格朗日，拉普拉斯等科学家的研究，从建立流体力学模型开始，以严格的数学分析为工具逐步建成了《古典理论流体力学》。由于这种理论在建立模型时，常常忽略或简化流体黏性等性质，因此，所得结论与复杂的实际流动总是存在一定的误差。于是人们为了解决生产实践中的问题，又通过大量的试验和观察，以经验公式和系数的形式总结流体运动规律，建立了《实用水力学》。在这方面，达西、威斯巴赫、雷诺等学者做出了杰出的贡献。由于这种试验性的科学忽视理论而无力概括与分析大量试验的数据，因而它的应用受到较大的限制。此后，到 19 世纪，经过纳维尔、柯西、波阿松、斯托克斯等科学家的研究，建立了纳维尔—斯托克斯方程，并在本世纪又融入了儒可夫斯基研究的机翼理论、普朗特提出的附面层理论以及我国著名工程热物理学家吴仲华教授发表的“轴流、离心及混流透平机械内亚声速与超声速三元流体一般理论”等，使理论流体力学与实用水力学走向结合，形成了一门比较完善的应用学科《工程流体力学》。随着计算机水平的迅速提高，这门学科在解决工程中流体力学和流体机械的实际问题时发挥着越来越大的作用。

泵与风机的快速发展始于 18 世纪,由于蒸汽机的发明和采矿、钢铁工业的需要,出现了一种比较完善的以蒸汽机为动力的往复式泵与风机。之后又发明了离心式和轴流式泵与风机。与此同时欧拉和儒可夫斯基分别研究出叶片式泵与风机的基本方程式和升力公式,为泵与风机的设计提供了理论根据。到 19 世纪末,由于电动机的发明,泵与风机在工农业生产中得到了广泛的应用。本世纪 50 年代初,我国吴仲华教授的三元流动一般理论,又使流体机械的设计理论上升到一个新的高度,对流体机械的高速发展作出了很大的贡献。

随着科学技术的不断进步,泵与风机正向着大容量、高转速、高效率及自动化等方向发展。目前,国外轴流式送引风机的电动机功率已达 11000kW (707MW 机组用),两台离心式送风机合用一台汽轮机的驱动功率为 10100kW (729MW 机组用),而锅炉给水泵的驱动功率已高达 55MW、转速亦升为 7500r/min (1800MW 机组用)。泵与风机的单机容量迅速增大,转速成倍提高又促使其结构型式发生了很大的变化。如由于大容量发电机组的低风压、大流量要求,风机正向着轴流式发展。国外已有轮毂直径为 2240mm 的超大型伐列克斯型轴流风机。现代大型高扬程给水泵虽然仍用离心泵,但结构上已采用了新型圆筒形双层壳体,级数也因转速的提高而减至 2~3 级。这种泵具有效率高、检修方便、轴承间跨距小、轴的刚性强和运行安全可靠等优点。

此外,为了提高大容量泵与风机运行的经济性,变速传动已被广泛采用。在 300MW 以上发电机组中,通常配用汽轮机驱动的锅炉给水泵和采用电动机加液力耦合器的启动备用给水泵。锅炉送引风机除采用汽轮机驱动或液力耦合器作变速传动外,还广泛采用双速电动机、可控硅串级调速的绕线式电动机或变频器进行变速传动。

众所周知流体力学和泵与风机不仅在我国航空航天等领域内得到了广泛的应用和高速发展,而且在我国电力工业的发展上也取得了巨大成就。解放前,全国发电设备完全依赖国外进口,单机最大容量小于 6000kW,总装机容量也只有 1850MW。但是,解放后发展迅速,特别是党的十一届三中全会以来更是以惊人的速度发展。截至 1998 年 12 月,我国自行设计、制造的定型火力发电机组最大单机容量为 600MW,全国总装机容量达到 2.77×10^5 MW,居世界第 2 位。以长江葛洲坝水电站和黄河小浪底水电站为代表的投运水电装机容量约为 7×10^4 MW。当今世界最大的长江三峡水电站总装机容量达 1.82×10^4 MW,单机容量为 700MW。要与位居第二的龙滩水电站一样,均在兴建之中。在核能发电方面,我国的秦山和大亚湾两座核电站,总容量达 2268MW,并有 4 座核电站正在建设之中。这些令世人瞩目的成就以及即将启动的南水北调等工程,都充分说明,我国已经并且还将进一步为促进工程流体力学和泵与风机朝着更高、更新的阶段发展作出应有的贡献。

思考题

- 0-1 什么叫流体力学?它在热力发电厂中的作用和地位怎样?
- 0-2 泵与风机同《泵与风机》的含义有什么不同?它们在热力发电厂中的作用和地位怎样?
- 0-3 学习本课程的目的和任务是什么?
- 0-4 了解流体力学、泵与风机的发展概况对本课程的学习有何帮助?

流体力学基础

内容提要

本单元介绍流体及其基本物理性质。阐述压力、流速、能头、流量、流态、升力和阻力、附面层及其分离、马赫波和激波等基本概念。阐明液体机械运动的基本规律和流体流动阻力损失的基本知识，并举例说明它们在生产实践中的应用。

课题一 流体及其压力的概念

教学目的

理解流体及其压力的概念。掌握流体的基本物理性质与压力表示方法。建立流体力学中几种常用的力学模型概念。

一、流体及其基本物理性质

(一) 流体的概念

日常生活中我们可以看到，物体受到切向力作用时，会产生两种不同特性的基本变形。一种是在一定大小的切向力作用下，形状只会产生一定程度变化的变形。其特性是切向力不变，变形也不变。例如，放在斜面上的固体所产生的变形。另一种是在任何微小的切向力作用下，会产生与固体变形不同的变形。其特性是只要有任何微小的切向力作用，变形就会持续不断地进行下去，直到切向力消失为止。这种连续变形的特性叫做流动性。具有流动性的物质称为流体。例如，从观察倒在倾斜桌面上的油，在自身重力沿桌面的切向分力作用下流向低处和烟囱排出的烟气在微风作用下飘荡不息等自然现象中，可以看出液体和气体都具有这种流动性。因此，液体和气体又统称为流体。

流体是由分子组成的，而分子之间是存在间隙的。从微观角度看，流体的内部并不连续。但分子之间的间距很小，即使是分子排列很松散的空气， 0°C 时在一个标准大气压 101325Pa 下， 1cm^3 的体积内约有 2.7×10^{19} 个分子。这么小的体积却有如此多的分子，可见分子间的间隙与流体所占空间相比是微不足道的。因此，对于不讨论微观的分子运动，只研究宏观机械运动规律的流体力学来说，完全可以不考虑分子间的空隙，把流体假想为由无数连续分布的流体质点组成的连续介质。这种假设既能使流体力学摆脱研究分子运动的复杂性，又为应用连续函数这一数学工具来分析和研究流体的宏观机械运动创造了条件。本课程所研究的流体，就是这种具有流动性的连续介质。

(二) 流体的基本物理性质

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，首先要介绍以下与力和运动有关的流体物理性质。

1. 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的一种物理性质，是一切物质的共有属性。因此，它也是流体的固有性质。流体惯性同样是用质量度量的，质量大则惯性大。不同种类的流体之间常用质量的密集程度（即密度）来比较惯性的大小。密度大的流体，惯性大。在流体力学中，流体的质量 m 与这些质量所占有的体积 V 的比值，即单位体积流体所具有的质量叫作密度，以 ρ 表示，可以写为

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

在国际单位制中， m 的单位是 kg； V 的单位是 m^3 ；则 ρ 的单位是 kg/m^3 。

不同种类流体的密度值不同，几种常见流体的密度见表 1-1。同一种流体的密度值又随其温度和压力的变化而变化。水的密度变化可以从“热工学”的“未饱和水与过热蒸汽表”中查得，而气体的密度变化，可用完全气体^❶ 的状态方程来确定，即

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} \tag{1-2}$$

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

【例 1-1】 确定炉膛压力 p_2 为 98070Pa，温度 t_2 为 800℃时，烟气的密度 ρ_2 。假如此时烟气的体积 $V_2 = 100\text{m}^3$ ，则再求其质量 m 和所受重力 G 。已知 $p_1 = 101354\text{Pa}$ 、 $T_1 = 273\text{K}$ 时，烟气密度 $\rho_1 = 1.32\text{kg}/\text{m}^3$ 。

解 设所求烟气密度为 ρ_2 ，则由公式 (1-2) 知

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = 1.32 \times \frac{98070 \times 273}{101354 \times (273 + 800)} = 0.33 \text{ (kg}/\text{m}^3\text{)}$$

因为

$$V_2 = 100\text{m}^3$$

所以

$$m = \rho_2 V_2 = 0.33 \times 100 = 33 \text{ (kg)}$$

$$G = mg = 33 \times 9.81 = 323.73 \text{ (N)}$$

表 1-1 常用流体的密度
(压力为 1 个标准大气压时)

流体名称	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	流体名称	温度 (℃)	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

2. 压缩性和膨胀性

流体的压缩性是指恒温下其体积随压力增加而缩小的性质；流体的膨胀性是指定压下其体积随温度增加而增大的性质。流体的这种性质是使密度随温度和压力的改变而变化的

❶ 工程热力学中的理想气体在这里称为完全气体。

原因。

由试验可知, $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的水, 当压力为 $4.905 \times 10^5 \text{Pa}$ 时, 压力每增加 $9.81 \times 10^4 \text{Pa}$ (即 1at), 其体积相对减小量为 0.5×10^{-4} 左右。而压力为 1at, 温度为 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的水, 温度每升高 1°C , 其体积的增加量约为 4.22×10^{-4} , 可见水的压缩性和膨胀性都很小。由有关资料可知, 其他液体以及压力、温度变化很小, 流速不高的气体, 其压缩性和膨胀性也都很小。在工程实际计算中, 一般情况下, 常常不考虑流体的这种性质。

3. 黏性

如图 1-1 (a) 所示, 将 B 板固定, 并在两块足够大的平行平板 A 和 B 间充满液体后, 用水平力拉 A 板, 则可以发现只要拉力不太大, A 板将作匀速直线运动, 而两板间的液体也因此产生了与 A 板同方向的运动。这个现象说明 A 板既受到拉力的作用, 又受到来自液体且大小与拉力相等的阻力作用; 与此同时, 液体也受到 A 板给予的拖力作用。这对阻力和拖力总是阻碍板与液体间的相对运动, 试图使靠近 A 板面的液体流速接近 A 板速度 u_0 。另一方面, 两板间液体的运动又会使最下层液体对不动的 B 板产生拖力作用, 而 B 板也会给最下层液体一个反作用力, 产生阻力。这种作用和反作用的结果使靠近 B 板的液体流速接近于零。由此可知, 在拉动 A 板时, A、B 两板之间液体运动的速度大小从上到下是不等的, 最上层附着于 A 板的液体速度为 u_0 , 最下层附着于 B 板的液体速度为零。又因为流体是一种连续介质, 所以液体速度从 u_0 到零的变化必然是连续减小的。可以证明, 当沿平板运动方向上液体无压力降时, 液体流速如图 1-1 (a) 所示, 按直线规律分布。为此, 人们可以将 A 板带动下的整个液体流动, 看成是由许多不同流速的流层所组成的一种运动。即可以看成是由附着于 A 板的液体以拖力带动与其紧邻的一层液体, 这层液体又以拖力带动它下面的一层液体……, 这样依次一层带动一层, 相邻两层间以 du 的速度差作相对滑动的一种液体运动。用牛顿第三定律分析可知, 在这种层间有相对运动的液体中, 任意相邻的两层间都必然存在一对阻碍流层间相对运动的力。即快层对慢层的拖力 T 和慢层对快层的阻力 T' , 如图 1-1 (b) 所示。这一对力类似于相对滑动的固体间的摩擦力, 只是它们发生在相对运动的液体内部, 故称内摩擦力。流体运动时, 流体层间产生内摩擦力的特性叫做流体的黏性。流体运动时, 必须消耗自身的能量来克服黏性对运动的阻碍。因此, 黏性是引起流体运动时能量损失的根本原因。

因黏性而产生的内摩擦力 T 可用英国科学家牛顿通过实验得出的内摩擦定律计算, 即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中 T ——流体的内摩擦力, N;

μ ——流体的动力黏度, 或称动力黏滞系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

A ——两层流体间的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——流体的速度梯度, 表示在与流向相垂直方向上的速度变化率, 即沿法线方向

单位距离内流速变化的大小, 当流速变化均匀或 Δy 很小时, 它等于或近似等于 $\Delta u / \Delta y$, $1/\text{s}$ 。

由上式可知，当 $du/dy=1$ 、 $A=1$ 时， $T=\mu$ 。这说明当速度梯度和接触面积各为一个单位时，动力黏度 μ 在数值上等于内摩擦力 T 。因此，流体黏性的大小可以用动力黏度 μ 度量， μ 值愈大，流体的黏性愈强。

另外，在理论分析和计算中常遇到动力黏度和密度的比值，为了标记的方便，这个比值可用符号 ν 表示，称为运动粘度，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-4}$$

显然，运动黏度 ν 也是流体黏性大小的量度，单位是 m^2/s 。

工程上常用图 1-2 所示的恩格勒黏度计，测出液体的恩格勒黏度°E 的数值后，再用下面的公式计算，即

$$\nu = 0.0731 \text{ } ^\circ E - \frac{0.0631}{^\circ E} \quad (cm^2/s) \tag{1-5}$$

然后，将不同种类的流体，在不同温度和压力下的 μ 值和 ν 值汇编成图表，以备查用。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 (℃)	水		空 气	
	μ ($\times 10^6 Pa \cdot s$)	ν ($\times 10^6 m^2/s$)	μ ($\times 10^6 Pa \cdot s$)	ν ($\times 10^6 m^2/s$)
0	1788	1.792	17.16	13.70
30	801	0.805	18.73	16.61
60	470	0.478	20.10	19.60
90	315	0.326	21.58	22.90

通过大量实验证明，流体的黏性正如表 1-2 所示，其大小既与流体的种类有关，又随流体的温度和压力的变化而变化。温度升高时，液体的黏性减弱，气体的黏性增强。而压力变化对黏性的影响较小，常常不予考虑。

液体黏性随温度升高而降低的特性，对锅炉燃油的输送和雾化质量的提高，起着积极的作用。但是，对汽轮机组、泵与风机等转动机械的轴承润滑，则起消极作用。因为润滑油回油温度超过 75℃ 时，由于黏性降低，妨碍油膜的形成，会造成轴承温度异常升高，甚至引起轴瓦烧毁事故。

另外，由于恩格勒黏度°E 是一定温度下 200cm³ 的液体从恩格勒黏度计管嘴流出的时间 t 和 20℃ 的蒸馏水由恩格勒黏度计中流出时间 t_0 的比值，即 $^\circ E = t/t_0$ 。由于°E 测算方便，故在油品质量标准中，一般都用 50℃ 时，运动黏度的平均数值表示油品的牌号。如有两种汽轮机油在 50℃ 时的运动黏度分别为 18~22mm²/s 和 28~32mm²/s，那么，它们就分别是 20# 油和 30# 油。

(三) 流体的力学模型

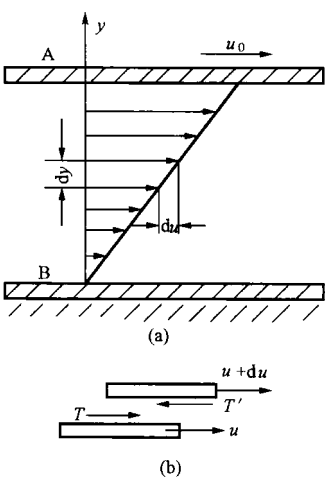


图 1-1 流体层间的相对运动与内摩擦

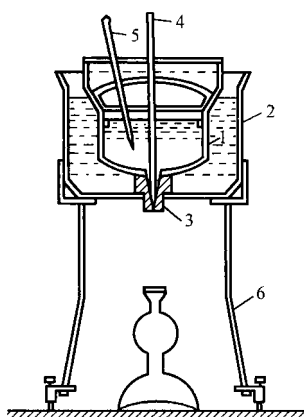


图 1-2 恩格勒黏度计

1、2—黄铜容器；3—管嘴；4—针杆；5—温度计；6—支架

从前面的讨论可知，流体的基本物理性质是影响流体机械运动规律的主要因素，但是在不同的运动中，并不是每个性质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，流体力学也是遵循由浅入深、由简到繁、由特殊到一般的认识规律。它首先忽略一些次要的或造成问题难以解决的性质，简化研究对象，通过理论研究找出特殊条件下流体运动的规律。再根据实际问题的需要有选择地考虑被忽略性质的影响，通过实验分析后以修正系数或经验公式等形式补充理论研究的不足，建立更一般、更加符合实际的流体运动基本规律。这种为了研究流体运动规律的方便和可能而简化的研究对象叫做流体的力学模型。流体力学就是在研究流体的各种力学模型中得到不断发展的。本课程常用的流体力学模型除前面所述的连续介质外，还有以下几种力学模型。

1. 不可压缩流体

忽略压缩性和膨胀性，密度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 50m/s 或压力变化不大（小于 9807Pa ）的气体都可以看作不可压缩流体。因此，不可压缩流体以液体为代表。常常简称为液体。但是在压力温度变化比较大或管道发生水击等问题中，即使是液体也要考虑它的压缩性。

2. 理想流体

假想的没有黏性的流体叫做理想流体。这种流体忽略了黏性。所以研究其运动规律时，可以不考虑能量损失。

3. 理想的不可压缩流体

假想的没有黏性、密度又可视作常数的流体，叫做理想的不可压缩流体。这种流体的物理性质最简单，只有惯性。

二、流体的压力及其表示

（一）流体压力的概念

1. 作用在流体上的力

研究流体机械运动的规律时，必须首先分析作用在流体上的各种力。为便于讨论，本课程将作用在流体上的力分为质量力和表面力两大类。

作用在流体每一个质点上并与质量成正比的力，称为质量力。常见的质量力有重力（ $G = mg$ ）以及流体作变速运动时虚加在它上面的惯性力，如直线变速运动的惯性力（ $F = ma$ ）和圆周运动时的惯性离心力（ $F = m\omega^2 r$ ）等。

作用在所取流体分离体表面上的力称为表面力。通常是指分离体以外物体通过接触面作用在分离体上的力。所谓分离体以外的物体可以是自由液面上的气体，或与流体相接触的固体壁面，还可以是在流体中与所选分离体接触的另一部分流体。如图 1-3 所示，在水平管道内运动的流体中，任取一个长方体的流体作为分离体，则分离体受到的表面力就是该分离体以外流体作用的结果。在受力分析图上，用它的法向分力 P 和切向分力 T 表示。

只是在不考虑黏性的静止液体或理想流体中, 或在与流动方向相垂直的接触面上, 切向分力等于零, 只有法向分力的作用。

2. 流体的静压力和动压力

在流体力学中, 垂直且指向流体分离体表面的法向分力叫作流体的总压力, 用 P 表示, 单位是 N 。如果以图 1-3 中面积为 ΔA 的接触面为研究表面, 并设该面上的总压力为 ΔP , 那么这个总压力与面积的比值称为面积 ΔA 上的流体平均压强, 它是该表面单位面积上所承受总压力的平均值, 习惯叫做流体平均压力, 用 $\bar{p}$ 表示, 即

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-6)$$

通常, 流体平均压力不能反映研究表面上某一点的真实压力。但是, 在流体力学中需要分析和计算的往往是流体某点的压力。流体内部任意点单位面积上所承受的总压力, 称为该点的压力, 用 p 表示。从数学上讲, 它就是面积 ΔA 以该点为中心无限缩小而趋向于零时, 该面积上平均压力的极限, 即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \bar{p} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-7)$$

流体处于平衡状态 (即流体质点之间没有相对运动的状态) 时某点的压力称为该点的流体静压力。

流体处于运动状态时某点的压力称为该点的流体动压力。

(二) 流体压力的表示

1. 压力的表示方法

工程实际中, 由于压力有两种不同的计算基准, 因而有以下不同的表示方法。

(1) 绝对压力。即以绝对真空 (又称完全真空) 为零点起算的压力, 用 p 表示。绝对压力总是正值, 反映流体中某一点全部的压力。在问题涉及流体本身的性质 (如计算或查阅流体状态参数) 时, 都必须用绝对压力。

(2) 相对压力。即以当地大气压为零点起算的压力, 用 p_x 表示。它是绝对压力与大气压力 p_a 的差, 反映流体中某一点压力高出大气压力部分的数值, 即

$$p_x = p - p_a \quad (1-8)$$

由于地球上的物体都要受到大气压力的作用, 所以容器内流体的压力与外界大气压力对壁面的力学效应将相互抵消一部分。如图 1-4 所示, 处于大气中的压力表弹簧管内, 若流体的压力与外界大气压力相等, 则两者对管壁的力学效应将相互抵消, 等于没有力的作用, 压力表的读数为零; 若弹簧管内流体压力高于大气压力, 则相对压力将对管壁产生力学效应, 使压力表指针移动, 从而显示出这个相对压力值。因此, 相对压力又称表压力或计示压力。在工程技术中, 为便于实现压力的测量以及简化流体力学的计算问题, 常常以相对压力表示流体的压力。

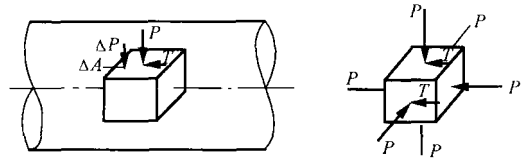


图 1-3 作用在运动流体分离体上的表面力