



普通高等教育“十二五”规划教材(高职高专教育)



普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)

# 流体力学 泵与风机

LIUTILIXUE BENGYUFENGJI

(第二版)

张燕侠 主 编 ●

黄蔚雯 副主编 ●



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材(高职高专教育)



普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育)

# 流体力学 泵与风机

LIUTILIXUE BENGYUFENGJI

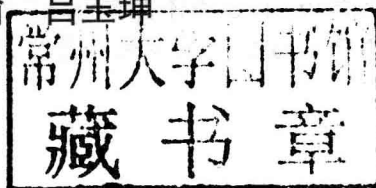
(第二版)

主 编 张燕侠

副主编 黄蔚雯

编 写 王祥薇 何 鹏

主 审 张良瑜 吕玉坤



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

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；泵与风机主要包括泵与风机的分类和构造，叶片式泵与风机的叶轮理论、叶片式泵与风机的性能、泵与风机的运行、发电厂常用泵与风机，泵与风机的检修等。

本书适用于高职高专院校电厂热能动力装置专业和火电厂集控运行专业，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. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2013. 8

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育  
ISBN 978-7-5123-3814-2

I. ①流… II. ①张… III. ①流体力学—高等职业教育—教材  
②泵—高等职业教育—教材③鼓风机—高等职业教育—教材  
IV. ①O35②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 287829 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版

2013 年 8 月第二版 2013 年 8 月北京第七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 435 千字

定价 32.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
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“十二五”规划教材（高职高专教育），是根据教育部审定的能源动力类主干课程教学大纲编写而成的。

本教材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，突出现代大型泵与风机的新技术、新工艺。加强针对性和实用性，增加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。该教材图文并茂，深入浅出，通俗易懂。

本书作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育），自2007年8月出版以来，受到普遍欢迎。为适应新的教学需要，本书在保持原教材特色的基础上，作以下修改。

(1) 伯努利方程的推导在静力学基本方程的基础上从能量守恒定律（即其物理学意义方面）导出，以便于对伯努利方程的理解与掌握。

(2) 为扩大教材的适应性，增加了核电站常用泵及其检修工艺。

(3) 删去了第十章的“第一节 常用检修工器具”和“第二节 转子部件的检修基础工艺”，以强化教学内容的针对性。

(4) 第十章中增加了双壳体圆筒式多级离心泵的检修工艺，以适应大型机组检修岗位的需求。

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、第四、第六～八章；安徽电气工程职业技术学院黄蔚雯编写第一～三章；安徽电气工程职业技术学院王祥薇编写第五、第九章；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电气工程职业技术学院国家级精品课程，与本教材配套的多媒体立体动画课件及相关教学资料的获取请登录 <http://www.aepu.com.cn>。

由于编者水平有限，对于书中存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者  
2013年6月

# 第一版前言

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”为安徽电气工程职业技术学院国家级精品课程，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                   |    |
| 第一版前言                |    |
| 绪论                   | 1  |
| 小结                   | 5  |
| 思考题                  | 5  |
| <b>上篇 流 体 力 学</b>    |    |
| <b>第一章 流体及其物理性质</b>  | 6  |
| 第一节 流体的特征和连续性介质假设    | 6  |
| 第二节 流体的基本物理性质        | 7  |
| 第三节 作用在流体上的力         | 14 |
| 小结                   | 15 |
| 思考题                  | 16 |
| 习题                   | 16 |
| <b>第二章 流体静力学</b>     | 18 |
| 第一节 流体静压强及其特性        | 18 |
| 第二节 流体压强的表示方法        | 19 |
| 第三节 流体静力学基本方程        | 22 |
| 第四节 流体静力学基本方程的应用     | 26 |
| 第五节 静止液体作用在壁面上的总压力   | 34 |
| 小结                   | 40 |
| 思考题                  | 42 |
| 习题                   | 43 |
| <b>第三章 流体动力学</b>     | 46 |
| 第一节 流体运动的基本概念        | 46 |
| 第二节 一维管流的连续性方程       | 51 |
| 第三节 伯努利方程及其应用        | 53 |
| 第四节 动量方程及其应用         | 63 |
| 第五节 水击现象及其预防         | 68 |
| 小结                   | 71 |
| 思考题                  | 72 |
| 习题                   | 73 |
| <b>第四章 流动阻力及能量损失</b> | 78 |
| 第一节 流体流动阻力及其分类       | 78 |

|     |             |     |
|-----|-------------|-----|
| 第二节 | 流体流动两种状态    | 79  |
| 第三节 | 圆管中流体的层流与紊流 | 83  |
| 第四节 | 流动阻力损失的计算   | 86  |
| 第五节 | 减少流动阻力损失的途径 | 95  |
| 第六节 | 管道的水力计算     | 98  |
| 第七节 | 绕流物体的阻力和升力  | 104 |
|     | 小结          | 109 |
|     | 思考题         | 111 |
|     | 习题          | 111 |

### 下篇 泵 与 风 机

|            |                     |     |
|------------|---------------------|-----|
| <b>第五章</b> | <b>泵与风机的分类和构造</b>   | 114 |
| 第一节        | 泵与风机的分类             | 114 |
| 第二节        | 泵与风机的主要性能参数         | 119 |
| 第三节        | 离心式泵与风机的构造          | 124 |
| 第四节        | 轴流式(混流式)泵与风机的构造     | 139 |
|            | 小结                  | 144 |
|            | 思考题                 | 146 |
|            | 习题                  | 146 |
| <b>第六章</b> | <b>叶片式泵与风机的叶轮理论</b> | 148 |
| 第一节        | 离心式泵与风机的叶轮理论        | 148 |
| 第二节        | 轴流式泵与风机的叶轮理论        | 159 |
|            | 小结                  | 164 |
|            | 思考题                 | 166 |
|            | 习题                  | 167 |
| <b>第七章</b> | <b>叶片式泵与风机的性能</b>   | 168 |
| 第一节        | 泵与风机的损失与效率          | 168 |
| 第二节        | 泵与风机的性能曲线           | 172 |
| 第三节        | 泵与风机的相似定律及其应用       | 180 |
| 第四节        | 泵内汽蚀                | 191 |
|            | 小结                  | 200 |
|            | 思考题                 | 202 |
|            | 习题                  | 203 |
| <b>第八章</b> | <b>泵与风机的运行</b>      | 205 |
| 第一节        | 泵与风机的工作点及运行稳定性      | 205 |
| 第二节        | 泵与风机的联合工作           | 208 |
| 第三节        | 泵与风机的运行工况调节         | 211 |
| 第四节        | 泵与风机的运行及维护          | 220 |
|            | 小结                  | 225 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 思考题·····                  | 226        |
| 习题·····                   | 227        |
| <b>第九章 发电厂常用泵与风机·····</b> | <b>229</b> |
| 第一节 发电厂常用泵·····           | 229        |
| 第二节 发电厂常用风机·····          | 239        |
| 第三节 核电站常用泵·····           | 244        |
| 小结·····                   | 250        |
| 思考题·····                  | 251        |
| <b>第十章 泵与风机的检修·····</b>   | <b>253</b> |
| 第一节 泵的检修·····             | 253        |
| 第二节 风机的检修·····            | 269        |
| 小结·····                   | 275        |
| 思考题·····                  | 275        |
| <b>参考文献·····</b>          | <b>277</b> |



## 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和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

发电厂都是以水、蒸汽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 所示为火力发电厂系统简图，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。

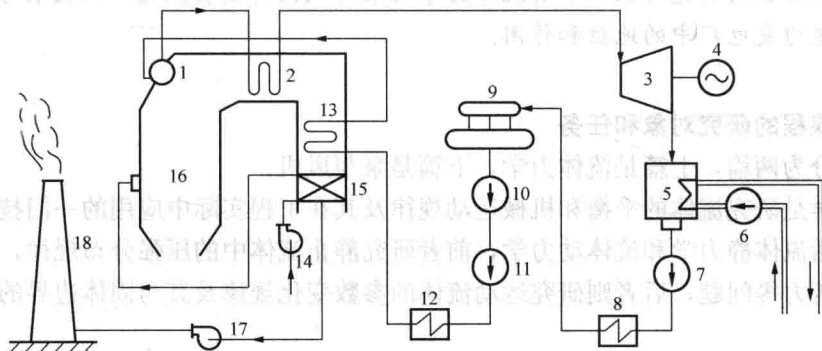


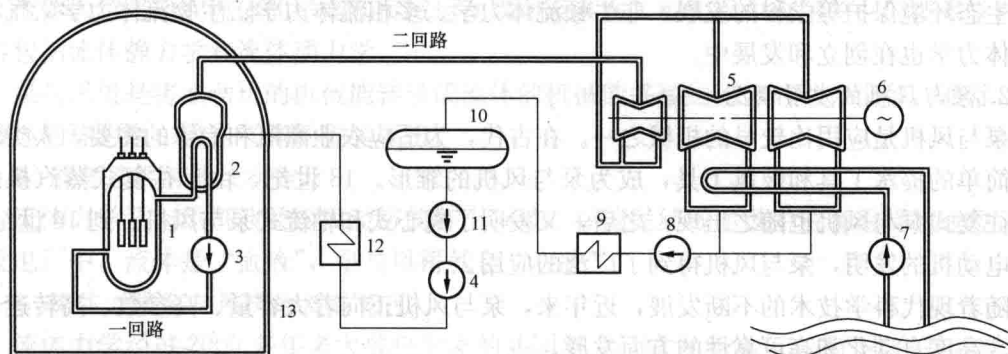
图 0-1 火力发电厂系统简图

- 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℃ 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 100~200℃ 的高温烟气，排粉风机则要输送含有固体颗粒的流体。

图 0-2 所示为核电站系统简图，它由两部分组成，一部分是利用核能产生蒸汽的核岛，包括核反应堆和一回路系统。一回路中冷却水，由核反应堆主冷却剂泵（简称核主泵）送入核反应堆，吸收核裂变产生的热能后流出，进入蒸汽发生器将热量传给二回路中水，使之变成蒸汽；另一部分是利用蒸汽的热能转换成电能的常规岛，它包括汽轮发电机组及其系统，与

火电厂中的汽轮发电机组情况大同小异。给水泵将二回路的水送往蒸发器，使二回路的水通过蒸发器生成蒸汽，蒸汽推动汽轮机，进而带动发电机发电。凝结水泵将凝结水打入加热器进行再次循环。循环水泵将来自海洋的冷却水送往冷凝器冷却汽轮机排汽。另外，为保证核电站安全，还有设置有高低压安全注水泵（简称安注泵）、余热导出泵、喷淋泵、辅助给水泵等。



0-2 核电站系统简图

1—反应堆压力容器；2—蒸汽发生器；3—主冷却剂泵；4—给水泵；5—汽轮机；6—发电机；7—循环水泵；  
8—凝结水泵；9—低压加热器；10—除氧器；11—前置泵；12—高压加热器；13—安全壳

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。如现代大型的火电厂中，由于汽包锅炉的容量大，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，输送流体的是泵或风机，因此，对发电厂而言，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，提出了流体流动的两种状态——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。在火力发电厂中，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

- 0-1 本课程的研究对象是什么？
- 0-2 简述火力发电厂中的热力循环过程，其工作介质有哪些？
- 0-3 火力发电厂中主要有哪些泵与风机？
- 0-4 核电站主要有哪些泵？
- 0-5 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

通常我们说能流动的物质为流体。严格地用力学语言来描述流体的定义为: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。只要有这种剪切力的作用,不论其大小如何、变化与否,流体就会继续变形(流动);只有当这种外力停止作用时,流体的变形才会停止。而固体则不同,当受到剪切力作用时,固体仅产生一定程度的变形,只要作用力保持不变,固体的变形也就不再变化。可见,流体具有容易变形(流动)的特征,这就是流体的流动性。液体和气体容易流动,所以我们把液体和气体称之为流体。液体受重力作用流向低处、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,  $1\text{cm}^3$  液体中含有  $3.3 \times 10^{22}$  个左右的分子,相邻分子间的距离约为  $3.1 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。 $1\text{cm}^3$  气体中含有  $2.7 \times 10^{19}$  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  $\rho$  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 <sup>3</sup> ) | 流体名称  | 温度 (°C) | 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|---------|-------------------------|-------|---------|-------------------------|
| 汽油   | 15      | 730~755                 | 纯水    | 4       | 1000                    |
| 柴油   | 20      | 840~900                 | 水银    | 0       | 13 600                  |
| 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；

$\rho$ ——气体的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$T$ ——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  $p_1$ 、 $T_1$ 、 $\rho_1$  和  $p_2$ 、 $T_2$ 、 $\rho_2$ ——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/m<sup>3</sup>，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

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

## 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  $\beta_p$  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  $\beta_p$ ——流体的压缩率，m<sup>2</sup>/N；

$dp$ ——流体压强的增加量，Pa；

$V$ ——流体的原有体积，m<sup>3</sup>；

$dV$ ——流体体积的缩小量，m<sup>3</sup>。

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，故在式 (1-4) 中



加个负号，以使压缩率  $\beta_p$  为正值。

压缩率  $\beta_p$  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  $4^\circ\text{C}$  范围内，水的  $\beta_p = 5.31 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ ；反过来说，液体的弹性系数值却很大，水的弹性系数  $E_0 = \frac{1}{\beta_p} \approx 1.88 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。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  $\beta_T$  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  $\beta_T$ ——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  $\text{K}$ ；

$V$ ——原有流体的体积， $\text{m}^3$ ；

$dV$ ——流体体积的增加量， $\text{m}^3$ 。

流体体胀系数  $\beta_T$  与压强和温度有关。对于大多数液体， $\beta_T$  随压强的增加而减小， $\beta_T$  随温度的增加稍为增大。但液体的体胀系数  $\beta_T$  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  $70 \text{ m/s}$  或压强变化不大且小于  $9807 \text{ Pa}$  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  $20^\circ\text{C}$ ，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  $80^\circ\text{C}$ ，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  $\beta_T = \frac{1}{\Delta V} \frac{\Delta V}{\Delta t}$  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  $\Delta V + V = 100.32 (\text{m}^3/\text{h})$