



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

发电厂 动力设备

程翠萍 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

本书主要讲述工程热力学、流体力学的基础知识；锅炉的工作原理、锅炉构造及蒸汽净化的原理；汽轮机的工作原理、构造，调节系统的工作原理；火力发电厂的各种系统等。本书紧紧围绕火力发电厂能量转换过程，着重阐述能量转化过程中的有关概念、定律，以及火力发电厂的有关设备和系统等。本书内容深入浅出，通俗易懂。

本书可作为职业院校电力技术专业相关课程教材，也可供现场有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂动力设备/程翠萍主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-6020-1

I. 发… II. 程… III. 发电厂-动力装置-职业教育-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130723 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>)

北京丰源印刷厂印刷

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 12.25 印张 293 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.00 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

本书是根据电力职业教育教学改革大纲的要求，结合火力发电厂的实际情况编写的。

本书根据技术应用型人才的要求，在以够用为度和不破坏内容系统性的前提下，着重强调了知识的应用性。在文字表达上，力求深入浅出，通俗易懂，并配有各种设备的现场图片。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学要求和有关岗位资格和技术等级要求；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色。本书既可以作为职业教育教学用书，也可以作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书绪论、第一章~第三章、第五章、第九章、第十二章由山东省电力学校程翠萍编写；第四章由山东省电力学校张瑶瑶编写；第六章~第八章由山东省电力学校牛勇编写；第十章、第十一章由山东省电力学校代云修编写。全书由程翠萍主编并统稿，马明礼主审。本书的编写得到了相关电厂和有关同事的大力帮助，在此表示感谢。

由于编者水平有限，编写过程中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2007年7月

目 录

64	器端文殊 并正英	7
74	器端文殊 并正英	7
84	器端文殊 并正英	8
94	器端文殊 并正英	10
前言		11
绪论		12

第一篇 基础知识

第一章 工质及其热力状态	7
第一节 基本概念	7
第二节 工质的热力状态及基本状态参数	8
第三节 平衡状态及气体的状态方程	10
思考题	11
习题	12
第二章 热力学定律	13
第一节 准平衡过程和可逆过程	13
第二节 功和 $p-v$ 图	15
第三节 热量、熵和 $T-s$ 图	16
第四节 热力学第一定律	18
第五节 热力过程	21
第六节 热力循环	23
第七节 热力学第二定律	24
第八节 卡诺循环	25
思考题	26
习题	27
第三章 水蒸气及蒸汽动力循环	28
第一节 饱和温度和饱和压力	28
第二节 等压下水蒸气的形成过程	28
第三节 水蒸气的 $h-s$ 图	30
第四节 蒸汽动力循环	32
思考题	37
第四章 传热学	38
第一节 导热	38
第二节 对流换热	39
第三节 热辐射	41
第四节 传热过程	42

第五节 热交换器	43
思考题	45
习题	46
第五章 流体力学	47
第一节 流体的基本性质	47
第二节 流体静力学基本原理	48
第三节 流体动力学基本原理	49
思考题	52
习题	53

第二篇 锅炉设备

第六章 锅炉设备概述	54
思考题	56
第七章 燃料的燃烧及燃烧设备	57
第一节 燃料概述	57
第二节 电厂锅炉用煤	57
第三节 煤粉制备	64
第四节 燃烧的基本原理	71
第五节 锅炉机组热平衡	73
第六节 燃烧设备	76
思考题	82
第八章 锅炉汽水系统及锅炉受热面	83
第一节 蒸发设备	83
第二节 自然水循环原理	86
第三节 蒸汽净化	87
第四节 过热器、再热器及调温设备	91
第五节 省煤器和空气预热器	98
思考题	103

第三篇 汽轮机设备

第九章 汽轮机的工作原理	104
第一节 汽轮机在火力发电厂中的任务	104
第二节 汽轮机的基本工作原理	105
第三节 汽轮机的分类及型号	107
第四节 多级汽轮机的特性	111
思考题	116
第十章 汽轮机本体结构	117
第一节 汽缸的结构	117
第二节 隔板	119

第三节	汽封	120
第四节	轴承	121
第五节	动叶片	125
第六节	转子	127
第七节	联轴器和盘车装置	131
思考题		134
第十一章	汽轮机的调节系统	135
第一节	汽轮机的调节方式简介	135
第二节	汽轮机调节的任务与型式	136
第三节	液压调节系统	138
第四节	汽轮机数字电液调节系统 (DEH)	143
第五节	汽轮机的保护系统	155
第六节	供油系统	159
思考题		161
第十二章	发电厂热力系统及其辅助设备	162
第一节	发电厂原则性热力系统	162
第二节	全面性热力系统	164
第三节	发电厂辅助设备	170
第四节	火力发电厂的主要经济技术指标	181
第五节	发电厂的生产管理	184
思考题		186
参考文献		187

绪 论

一、电能国民经济中的作用和地位

电力工业是把一次能源转变为电能的生产行业。一次能源是指以原始状态存在于自然界中，不需要加工或转换就可直接供热、光或动力的能源，如石油、煤炭、天然气、水力、原子能、太阳能、风能、地热能、海洋能等，上述能源是当前被广泛使用的，所以称为常规能源。一次能源通过加工、转化生成的能源称为二次能源。电能是优质的二次能源。一些不宜或不便于直接利用的一次能源（如核能、水能、低热值燃料等）可以通过转换成电能而得到充分利用，由此扩大了一次能源的应用范围。电能可以很方便地转变为其他形式的能量；可以输送到很远的地方且输送损失小；能适应许多特种工艺的需要（如电镀、电解、电火花加工）；又能使生产过程较易实现自动化、无污染，有效地提高各行各业的生产自动化水平，促进技术进步，从而提高劳动生产率，改善劳动者的工作环境和条件。电能是提高人民的物质文化水平方面同样起着非常重要的作用。世界各国都把电力工业的发展速度和电能消耗占总能源消耗的比例作为衡量一个国家现代化水平的标志。

二、电力生产的特点及基本要求

目前，电能还不能大量储存。这就要求发电厂所发出的电功率必须随时与用户所消耗的电功率保持平衡，以保证用户对电量的需求。电厂设备的运行工况必须随着外界负荷的变化而改变。根据电能的这一特点，对电能生产提出了如下要求。

1. 安全可靠

电力工业是连续进行的现代化大生产，一个小事故处理不当就可能发展成大面积的停电事故，给工农业生产和人民生活造成严重的危害，所以电力生产必须保证发电和供电的可靠性与安全性。

2. 力求经济

截止 2005 年底，全国发电量达到 24747 亿 kW·h，其中，水电发电量约占全部发电量的 16%；火电发电量约占全部发电量的 81.5%；核电发电量约占全部发电量的 2.1%。可见我国的电力生产仍以火电为主，所消耗的一次能源多，而能源的利用率又很低，大约为 30%，先进国家在 40% 左右，因此节能的潜力很大。所以要求机组力求经济运行，提高能源的利用率。

3. 保证电能质量

随着电力工业的不断发展，电网越来越大，已建成 500kV 跨省大型电力系统。为保证电能质量，必须使电网频率保持在规定的范围之内。

4. 控制污染，保护环境

火电厂在生产过程中产生的烟尘、SO₂、NO_x、废水、灰渣和噪声等污染环境，危害人民的身体健康，必须采取有效措施严格控制。可以说，火电厂环保的优劣已成为一个国家电力工业技术水平高低的标志之一。

三、电厂的类型

(一) 按使用的能源分

1. 火力发电厂

电能是由其他能量转换而来的。一般把利用燃料的化学能转换成电能的工厂称为火力发电厂。火力发电厂是利用煤、石油、天然气作为燃料，在锅炉设备中通过燃烧和传热，把燃料的化学能转换成水蒸气的热能，再借助于汽轮机设备将蒸汽的热能转换成机械能，然后通过发电机将机械能转换成电能。火电厂要以燃煤为主，并且优先使用劣质煤，除国家批准的燃油电厂外，严格控制电厂使用燃油。

2. 水力发电厂

以水能作为动力发电的电厂称为水力发电厂。其生产过程是由拦河坝维持的高水位的水经压力水管进入水轮机推动转子旋转，将水能转变成机械能，水轮机带动发电机旋转，从而使机械能转变为电能，在水轮机中做完功后的水流经尾水管排入下游。水力发电厂与抽水蓄能电厂示意图如图 0-1 所示。

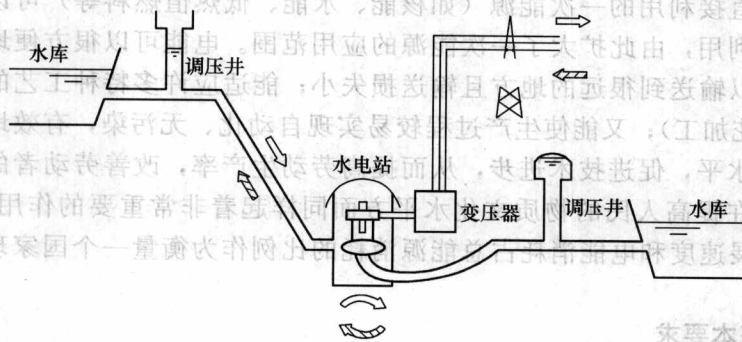


图 0-1 水力发电厂与抽水蓄能电厂示意图

与火力发电相比，水力发电具有发电成本低（仅是同容量火电厂的 1/10 或更低）、效率高、环境污染小、启停快（从静止状态到满负荷运行只需要 4~5min，而火电机组则需要数小时）、事故应变能力等优点。但修建水电站的施工工程量大，需修建拦河大坝、远距离输电、移民搬迁等，使得水电站的投资远比火电厂大。

3. 原子能发电厂

将原子核裂变释放出的能量转变成电能的电厂为原子能发电厂，简称核电站。原子能发电厂由两部分组成，一部分是利用核能产生蒸汽的核岛，它包括核反应堆核一回路系统，核燃料在反应堆中进行链式裂变产生热能，一回路中冷却水吸收裂变产生的热能后流出反应堆，进入蒸汽发生器将热量传给二回路中的水，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，与传统的火电厂的机组大同小异。核电站简要流程图如图 0-2 所示。

原子能发电比火力发电有许多优越性，其燃料能量高度密集，避免燃料的繁重运输，运行费用低，无大气污染，但基建投资大。在能源短缺的今天，原子能发电将会得到更大的发展。我国核电厂建设起步较晚，但发展很快，秦山核电厂 310MW 发电机组已于 1991 年并网发电，二期 2×600MW 机组也已于 2002 年投入运行。大亚湾核电站 2×900MW 机组于 1994 年投入运行。

4. 生物发电厂

我国能源储备中煤炭占到了 92%，这决定了我国能源生产和消费结构在今后相当长的

时期内仍将以煤炭为主。以煤炭为主的能源结构及能源利用效率低下等众多因素造成了我国环境受到严重污染，生态遭到破坏，过度开采造成大面积土地塌陷，二氧化硫和二氧化碳排放量分别列居世界第一位和第二位，造成的经济损失占全国 GDP 总量的 3%~7%。

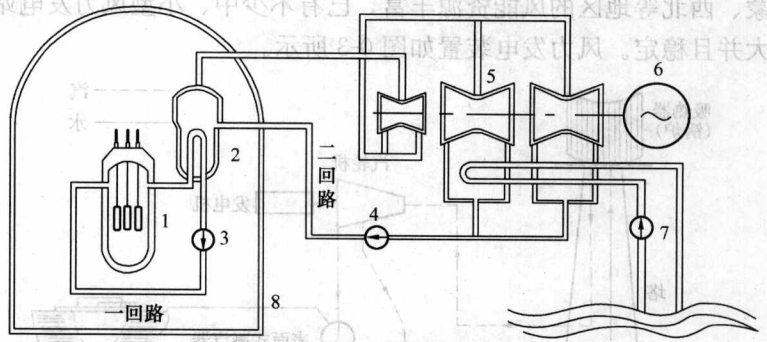


图 0-2 核电站简要流程图

- 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—安全壳

我国生物质能资源非常丰富，主要的农作物种类有稻谷、小麦、玉米、豆类、薯类、油料作物、棉花和甘蔗等，农作物秸秆是一种很好的清洁可再生能源，每两吨秸秆的热值就相当于一吨煤，是当今世界仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源。

秸秆发电就是利用秸秆燃烧产生的热量，使水转化为水蒸气，推动汽轮机转动，再通过发电装置发电。采用秸秆发电技术，不仅可以缓解电力供应紧张的矛盾，而且能有效增加农民收入，促进社会和经济的可持续发展。

有别于传统的火力发电，农作物秸秆发电的发展应突破 3 个瓶颈：秸秆供应和成本、技术和设备，以及上网电价问题。

5. 抽水蓄能电厂

将电力系统负荷处于低谷时的多余电能转换为水的势能，在电力系统负荷处于高峰时又将水的势能转换为电能的电厂为抽水蓄能电厂，或称抽水蓄能电站。这种水电站因有两次水的势能与电能之间的转换，所以存在一定的能量损失。但随着电力负荷的急剧增长，特别是对有大型核电站带基本负荷的电力系统，它在电力系统调峰、调频中的作用会更为显著，因而发展较快。

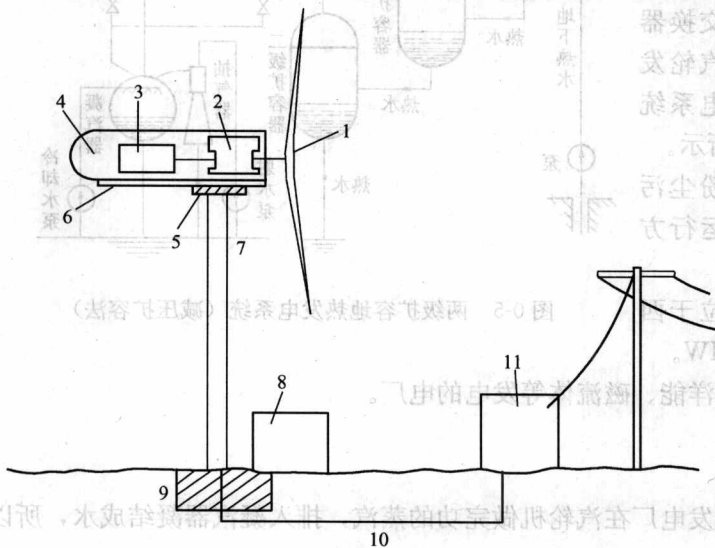


图 0-3 风力发电装置

- 1—叶片；2—升速装置；3—发电机；4—感受元件、控制装置、防雷保护等；
5—改变方向的驱动装置；6—底板和外罩；7—支撑铁塔；8—控制和保护装置；9—土建基础；10—电力电缆；11—变压器和开关

6. 风力发电厂

利用高速流动的空气即风力驱动风车转动，从而带动发电机发电的电厂称为风力发电厂。我国内

蒙、西北等地区的风能资源丰富，已有不少中、小型风力发电站在运行。风力发电要求风速大并且稳定。风力发电装置如图 0-3 所示。

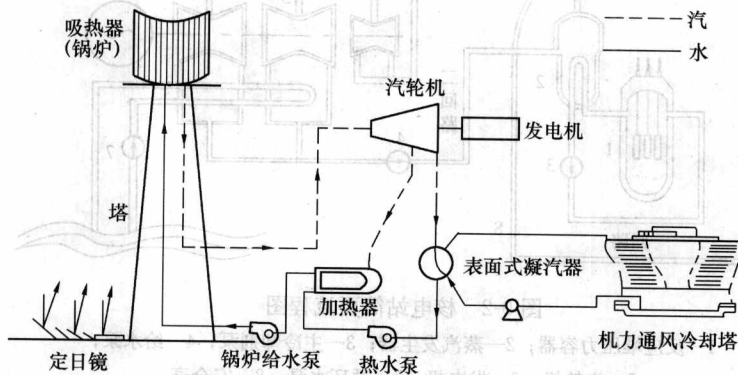


图 0-4 塔式太阳能电站热力系统流程图

如图 0-4 所示；另一类是将太阳能直接分配给高效能光电池，产生直流电并经逆变后送到用户。

太阳能电站的缺点是占地面积大，造价高，受天气和纬度的影响大，需庞大的蓄能设备，影响其大量发展。

8. 地热发电厂

地热发电厂发电的原理和设备与火力发电厂基本相同。对地下不含水分的蒸汽可直接送入汽轮发电机组发电；对地下的汽水混合物，经过扩容器降压产生水蒸气，或通过热交换器使低沸点液体产生蒸汽，通过汽轮发电机组发电。两级扩容地热发电系统（减压扩容法）示意图如图 0-5 所示。

地热发电不消耗燃料，无粉尘污染，发电成本低，系统简单，运行方便，但效率较低。

目前我国最大的地热电厂位于西藏的羊八井地区，总容量为 18MW。

另外，还有利用潮汐能、海洋能、磁流体等发电的电厂。

而区(二) 按输出能源分类

1. 发电厂

发电厂只生产电能，如火力发电厂在汽轮机做完功的蒸汽，排入凝汽器凝结成水，所以又称为凝汽式电厂。

2. 热电厂

热电厂既生产电能又对外供热，供热是利用汽轮机较高压力的排汽或可调节抽汽送给热用户。

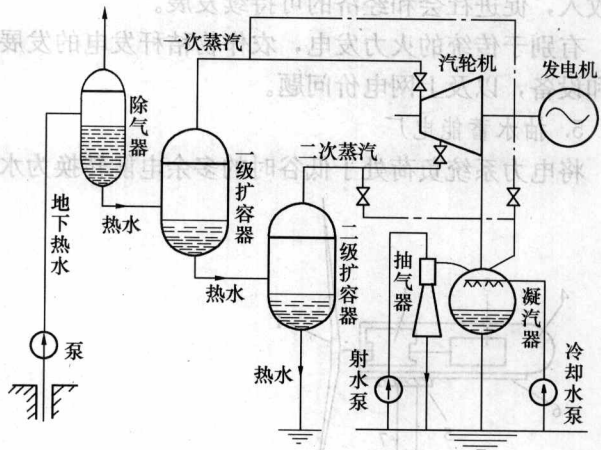


图 0-5 两级扩容地热发电系统（减压扩容法）

(三) 按供电范围分类

1. 区域性电厂

在电网内运行, 承担一定区域性供电的大中型发电厂。

2. 孤立发电厂

不并入电网内, 单独运行的发电厂。

3. 自备发电厂

由大中型企业自己建造, 主要供本单位用电的发电厂(一般也与电网相连)。

(四) 按发电厂总装机容量的多少分类

1. 小容量发电厂

其装机总容量在 100MW 以下的发电厂。

2. 中容量发电厂

其装机总容量在 100~250MW 范围内的发电厂。

3. 大中容量电厂

其装机总容量在 250~600MW 范围内的发电厂。

4. 大容量发电厂

其装机总容量在 600~1000MW 范围内的发电厂。

5. 特大容量电厂

其装机总容量在 1000MW 及以上的电

四、火力发电厂基本生产过程

由于 80% 左右的电厂为火力发电厂, 因此本课程以火力发电厂为主讨论能量的转换过程。现以凝汽式火力发电厂为例来说明其生产过程。

火力发电厂的生产过程是利用煤、石油、天然气作为燃料, 在锅炉设备中通过燃烧和传热, 把燃料的化学能转换成水蒸气的热能, 再借助于汽轮机设备将蒸汽的热能转换成机械能, 然后通过发电机将机械能转换成电能。

煤由输煤皮带运至锅炉房中的煤斗中, 再进入磨煤机将其磨成煤粉, 在热空气的输送下, 经由燃烧器送入炉膛中燃烧。来自环境中的空气经送风机送入锅炉尾部烟道中的空气预热器进行加热, 加热后的热空气一部分用来输送煤粉和助燃(一次风), 另一部分直接进入燃烧器喷入炉膛, 起搅拌作用, 使煤粉和空气混合得更加均匀, 以提高燃烧效率(二次风)。煤粉燃烧后所放出的热量, 一部分传给水冷壁管加热锅水, 另一部分随烟气进入烟道, 加热器、省煤器、空气预热器中汽、水、空气, 被冷却后的烟气通过除尘器除尘, 经引风机送入烟囱排入大气。另外, 炉膛排出的煤渣和除尘器排出的细灰用水沿冲灰沟冲入灰渣泵房, 由灰渣泵送至储灰场。

在水冷壁管中的锅水被加热后产生蒸汽, 蒸汽经汽包引入烟道中的过热器继续加热成过热蒸汽, 再进入汽轮机中膨胀做功, 把蒸汽具有的热能转换成旋转的机械能, 带动发电机转动, 最后转换成电能输出。在汽轮机中做完功以后的乏汽进入凝汽器, 经冷却水冷却成凝结水, 用凝结水泵打入低压加热器加热, 然后送入除氧器除氧, 除氧后的水经给水泵打入高压加热器, 再送入省煤器中加热后进入汽包。如此循环往复, 不断将燃料的化学能转换成电能。

凝汽式火力发电厂生产过程示意图如图 0-6 所示。

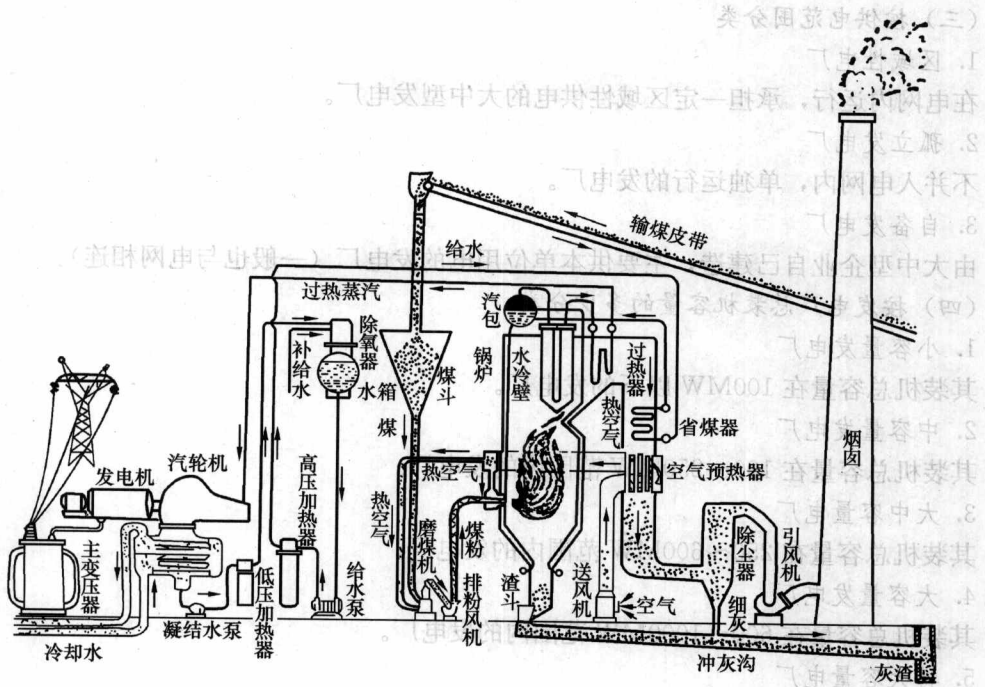


图 0-6 凝汽式火力发电厂生产过程示意图

五、本课程的主要内容

为了从本质上认识火力发电厂的生产过程，本书的第一篇《基础知识》部分将对热能转换成机械能的规律、条件、方法等进行较全面的阐述，从理论高度上来认识火力发电厂。在此基础上，在第二篇《锅炉设备》和第三篇《汽轮机设备》部分对燃料的化学能转换成蒸汽的热能和蒸汽的热能转换成机械能的原理、系统、设备等进行较具体的介绍，以便从理论和实际的结合上，进一步加深对火力发电厂的认识。

火力发电厂的生产过程，是一个复杂的物理化学过程。它包括燃料的燃烧、蒸汽的生成、机械能的转换、电能的产生、冷却水的循环、灰渣的排放等各个环节。本书将详细介绍各个环节的原理、设备和运行特点，使读者能够全面、系统地掌握火力发电厂的生产过程。

本书共分五篇，第一篇《基础知识》介绍火力发电厂的发展概况、生产流程、主要设备及其工作原理。第二篇《锅炉设备》详细介绍锅炉的结构、工作原理、运行特点及维护检修。第三篇《汽轮机设备》详细介绍汽轮机的结构、工作原理、运行特点及维护检修。第四篇《电气系统》介绍火力发电厂的电气系统组成、运行特点及维护检修。第五篇《环保与节能》介绍火力发电厂的环保要求和节能措施。

第一篇 基础知识

基础知识包括工程热力学、传热学、流体力学等内容。工程热力学主要研究热能和机械能之间的转换规律及方法；传热学主要研究由于温差引起的热能传递规律；流体力学主要研究流体的机械运动规律。

热能转换成机械能必须伴随着工作介质热力状态的连续变化。为了找出热能转换成机械能之间的数量关系及转换条件，需要对工作介质的热力状态以及热力状态连续变化的热力过程和热力循环进行较详细的研究。

热能的传递规律随着传递方式的不同而不同。因此，必须对不同传递方式的特点进行较深入的分析 and 比较。

火力发电厂离不开流体，其电能的生产依靠流体的流动而安全经济地实现热功转换。因此必须对流体的流动规律和流体流动过程中产生的流动损失进行深入的研究和探讨。

第一章 工质及其热力状态

第一节 基本概念

热能转换成机械能的设备统称为热机。汽轮机、蒸汽机、燃气轮机等都属于热机。热机中用来实现热能转换成机械能的工作介质简称为工质。由于工质连续不断地流过热力设备而膨胀做功，因此，要求工质应有良好的膨胀性与流动性。此外，还要求工质价廉、易得、热力性能稳定、不腐蚀设备、无毒等。在气体、液体、固体中，气体受热后膨胀性能最好，能最大限度地热能转换成机械能，同时它具有良好的流动性，易于流入和排出热机，显然，气态物质最适宜作工质。而水蒸气具有价廉易得、无毒、不腐蚀设备等优点，所以目前火力发电厂主要以水蒸气为工质。

一切气体都是由气体分子所组成的，根据分子物理学，物质的分子是不停地热运动着的。分子数量是巨大的，运动是不规则的。分子本身具有一定的体积，相互之间还具有作用力。因此，气体的性质是很复杂的。为了研究问题的方便，提出了理想气体这一概念。理想气体是一种实际上并不存在的假想气体。理想气体不考虑气体分子的体积和气体分子之间的相互作用力，凡不符合这两个条件的气体都称为实际气体。在一般情况下，空气、高温燃气等离液态都很远，在工程应用所要求的精度范围内，都可以当作理想气体。但对于锅炉中产生的水蒸气，由于离液态较近则不能当作理想气体处理，只能作为实际气体来处理。

在工程热力学中，常把能不断地供给热能的物体称为高温热源，简称热源。在热力过程中，主要是利用燃料在燃烧设备中燃烧而产生热能。由于燃料是源源不断地供给燃料设备的，所以可以认为热源的热容量是无限大的，不因向工质传热而降低温度。因此，每一热源对应有一恒定的温度。热源供给的热能由工质携带进入热机，将热能的一部分转变为机械能，余下的热能仍由工质携带，离开热机而排入大气或冷却水。这种接收工质排出剩余热能的物体称为低温热源，简称冷源。同理，由于大气容量无限大，也可认为冷源温度恒定

不变。

热动力装置的工作过程概括起来就是工质从高温热源吸取热能，将其中一部分转化为机械能，并把余下的一部分传给低温热源的过程。

为分析问题方便起见，热力学中常把分析的对象从周围的物体中分割出来，研究它通过分界面和周围物体之间的能量交换。这种被人为分隔出来的分析对象称为热力系统。系统外的一切物体统称为外界。热力系统和外界之间的分界可以是实际存在的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是尺寸和形状变化的，或者是运动着的。

热力系统与外界之间可能有以热和功的形式进行的能量传递，也可能同时有物质的交换。按照系统与外界进行物质交换的情况，系统可分为以下两类。

(1) 封闭热力系统（简称闭系）——系统与外界可以传递能量，但没有物质的交换。这类系统的特点是没有物质穿过边界，其内部的质量恒定不变，所以也可称为不流动热力系统。

(2) 开口热力系统（简称开系）——系统与外界既可以有能量的传递，又可以有物质的交换。由于有物质穿过边界，因而这类系统内部的质量可以保持恒定或发生变化，所以也可称为流动热力系。

按照系统与外界进行能量交换的情况，又可以定义出以下两类。

(1) 绝热热力系统——系统与外界没有热量交换的热力系统。

(2) 孤立热力系统——系统与外界不发生任何相互作用，既无物质交换又无能量交换的热力系统。

第二节 工质的热力状态及基本状态参数

热能转换成机械能是借助于工质吸热和做功来完成的。在这些过程中，工质的物理特性随时在发生变化。也就是说，工质的热力状态随时在发生变化。所谓工质的热力状态，就是指在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。在一定的热力状态下用来描述和说明工质的一些物理量则称为工质的状态参数。状态参数值只取决于工质的状态，也就是说，对应一定的状态，工质的各状态参数有确定的数值。因而，任何物理量，只要它的变化量等于始、终两态下该物理量的差值，而与工质的状态变化途径无关，都可以作为状态参数。

在热力学中，常用的状态参数有6个：温度、压力、比体积、热力学能、焓、熵。其中，温度、压力、比体积是工质的基本状态参数，热力学能、焓、熵是导出的状态参数。本节先介绍基本状态参数，其他状态参数将在后面章节中介绍。

一、温度

温度是标志物体冷热程度的一个物理量。热物体温度高，冷物体温度低。当两个物体接触时，温度高的物体就要向温度低的物体传热。如果两者间没有热量传递，则两物体的冷热程度一样，即处于热平衡状态，两物体温度相等。

处于热平衡的物体具有相同的温度，这是用温度计测量物体温度的依据。当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计的温度即等于被测物体的温度。

温度的数值表示方法称为温标。任何一种温标的建立，根本问题是确定温标的基准点和分度方法。摄氏温标规定在1标准大气压下纯水的冰点温度为0度，沸点的温度为100度，

两定点间分为 100 个分度，每一分度为摄氏 1 度。这种温标的温度以符号“ t ”表示，单位用“ $^{\circ}\text{C}$ ”。

国际单位制采用绝对温标为基本温标。用这种温标确定的温度为绝对温度，符号为“ T ”，单位为开尔文，代号为“ K ”。热力学温标选取水的三相点（即水的固、液、气三相平衡共存的状态）为基本定点，并定义它的温度为 273.16K ，摄氏温度为 0.01°C 。

显然，两种温标之间的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

摄氏温度与绝对温度之间每一温度间隔的大小完全一样，即 $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ ，只是所取零点不同，即绝对温度 273.15K 为摄氏温度的 0°C 。

由于两种温度间隔划分一样，因而凡涉及到温差的地方，用 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 在数值上均相同，即 $\Delta t = \Delta T$ 。在工程热力学中，一般都用绝对温度 T 作为工质的状态参数。在进行热力计算时，通常取

已足够准确。

从微观角度分析，物体的冷热程度取决于物体内部微粒运动的状况。按分子运动理论，气体的绝对温度与气体分子的平均动能成正比。气体分子平均动能越大，物体的温度就越高。所以，温度标志着物体内部分子无规则热运动的强烈程度。

二、压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。在物理学中称为压强，用符号“ p ”表示。气体分子运动论指出，气体的压力是气体分子作不规则运动时撞击容器器壁的结果。压力的方向总是垂直于容器壁面的。

(一) 压力的单位

在国际单位中，压力的单位为帕斯卡，简称帕 (Pa)， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。由于帕的单位太小，工程上常用兆帕 (MPa) 作为压力的单位， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。另外，在工程上还经常用工程大气压 (at) 表示， $1\text{at} = 9.8 \times 10^4\text{Pa} \approx 0.1\text{MPa}$ 。

压力的大小也可以用液柱高度表示，常用的有 mmHg (毫米汞柱) 和 mmH_2O (毫米水柱)。

$$1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa}$$

$$1\text{mmH}_2\text{O} = 9.81\text{Pa}$$

(二) 大气压力

地球表面包围着一层几百千米厚的空气层，这层空气层由于其自身的重量而对地面上的物体产生压力，这个压力称为大气压力，简称大气压。它随海拔高度和气候等条件的变化而变化。大气压力用 p_b 表示。

物理学中，将纬度 45° 海平面上的常年平均气压定作“标准大气压”，或称为“物理大气压”，用 atm 表示，以此作为度量压力的一种单位，与其他单位的换算关系如下：

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1.013 \times 10^5\text{Pa} = 1.033 \times 10^4\text{mmH}_2\text{O}$$

在工程计算中，大气压力 p_b 可以近似取 $p_b = 9.8 \times 10^4\text{Pa}$ 或 $p_b = 1\text{at}$ 。

(三) 绝对压力、表压力、真空

工质的真实压力称为绝对压力，以 p 表示。一般用弹簧管式压力计（如图 1-1 所示）或

U形管式压力计(如图1-2所示)测量。但是不管用什么压力计,测得的是工质的绝对压力和大气压力之间的差值。

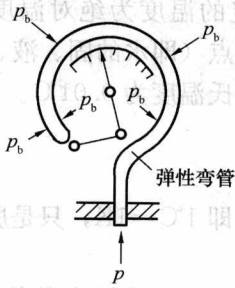


图1-1 弹簧管式压力计

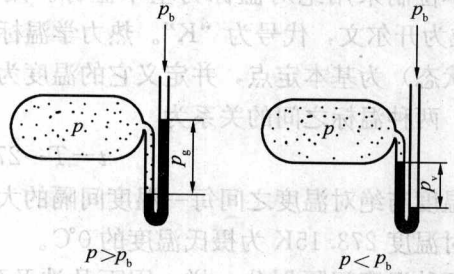
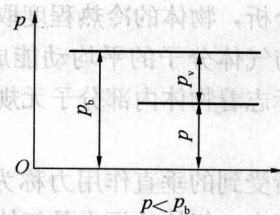
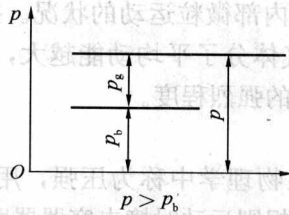


图1-2 U形管式压力计

工质的真实压力可以大于大气压力,也可以小于大气压力。当绝对压力高于大气压力时,称为正压,高出的数值称为表压力,用 p_g 表示,即压力计指示的数值。反之,则为负压或真空,用 p_v 表示。



对正压容器来说 ($p > p_b$)

$$p = p_b + p_g \tag{1-3}$$

对负压容器来说 ($p < p_b$)

$$p = p_b - p_v \tag{1-4}$$

因大气压力随测量时间、地点的变化而改变,所以只有绝对压力才能作为工质的状态参数,表压力和真空都不是状态参数。无特殊说明,本书的压力均指绝对压力。

三、密度及比体积

单位质量的工质所占有的体积称为该工质的比体积,用符号“ v ”表示,单位为 m^3/kg 。相反,单位体积的工质所具有的质量称为该工质的密度,用符号“ ρ ”表示,单位为 kg/m^3 。显然,比体积和密度互为倒数,即

$$v = \frac{1}{\rho} \tag{1-5}$$

比体积和密度不是互相独立的两个参数,而是同一个参数的两种不同的表示方法。在工程热力学中,通常用比体积作为状态参数。

第三节 平衡状态及气体的状态方程

一、平衡状态

压力、温度和比体积是工质的基本状态参数,可以用来描述系统中工质的状态。但是,