



“十三五”普通高等教育本科规划教材

# 电厂热力系统及设备

卢洪波 主 编

刘洪宪 赵星海 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育

# 电厂热力系统及设备

主 编 卢洪波  
副主编 刘洪宪 赵星海  
编 写 沙 鹏 郑建祥 贺 楠  
主 审 王广军



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。本书共分九章，主要内容包括热工基础及流体流动基础知识、燃料燃烧计算及锅炉热平衡、制粉系统与燃烧设备、锅炉汽水系统、汽轮机本体结构及工作过程、汽轮机辅助设备及系统、电厂热力系统及热经济指标、核电厂工作原理与系统。

本书作为普通高等教育教材，主要面向高等工科院校涉及电力工程的相关专业，也可为在此领域工作的工程技术人员提供参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电厂热力系统及设备/卢洪波主编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9659-3

I. ①电… II. ①卢… III. ①火电厂—热力系统—高等学校—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 192635 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>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 383 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

本书针对高等工科院校非能源动力类相关专业而编写，满足电气类、自动化类、土木类、环境科学与工程类和机械工程类等相关专业对“综合应用型”人才培养的需要。在编写过程中，注重理论与工程应用实践相结合，力争使读者掌握电力生产过程中涉及的热力设备的理论基础和原理、结构及运行的相关知识，突出行业特色、注重工程应用、跟踪最新技术，以适应科技发展和生产现场的需求。

本书主要内容涵盖了基础理论、燃煤发电机组和核能发电机组相关设备的工作原理、结构及运行知识。基础理论部分介绍了工程热力学、工程流体力学和传热学等相关内容；燃煤发电机组部分介绍了锅炉和汽轮机设备与系统以及相关运行知识等内容；核能发电机组部分介绍了核物理基础知识和核电厂设备、系统等相关的内容。全书内容注重面向现场、面向大型机组，紧跟当代电力技术发展的前沿。

全书共九章，由东北电力大学卢洪波主编，负责全书的统稿和部分章节编写；其他参加编写的人员有东北电力大学刘洪宪、赵星海、沙鹏、郑建祥和贺楠。本书由重庆大学王广军教授主审，王广军教授为书稿的完善付出了大量的心血和汗水，编者在此深表感谢！在本书编写过程中，电力行业的专家和兄弟院校的老师提出了许多宝贵的建议和意见，编者对所有关心、支持本书出版的专家和学者表示由衷的感谢！同时，本书编写的相关内容借鉴了兄弟院校、电力生产厂家、制造厂、设计院及相关科研院所的资料和经验，在此一并表示感谢！

由于编者水平所限，本书仍存在缺点和不足之处，恳请所有使用本书的读者给予批评指正。

编 者

2016年8月

# 目 录

前言	
<b>第一章 概述</b> .....	1
<b>第二章 热工基础及流体流动基础知识</b> .....	8
第一节 热力学基本概念与基本定律.....	8
第二节 水蒸气及其动力循环 .....	14
第三节 流体力学基本知识 .....	23
第四节 热量传递的基本原理 .....	30
<b>第三章 燃料燃烧计算及锅炉热平衡</b> .....	38
第一节 锅炉概述 .....	38
第二节 煤的成分及其主要特性 .....	41
第三节 燃料燃烧计算 .....	46
第四节 烟气分析 .....	50
第五节 锅炉机组热平衡 .....	53
<b>第四章 制粉系统与燃烧设备</b> .....	58
第一节 煤粉制备及系统 .....	58
第二节 燃烧理论概述 .....	66
第三节 煤粉气流的着火 .....	68
第四节 煤粉燃烧器 .....	72
第五节 煤粉炉炉膛 .....	80
第六节 点火装置 .....	81
第七节 空气预热器 .....	84
<b>第五章 锅炉汽水系统</b> .....	88
第一节 省煤器 .....	88
第二节 蒸发设备 .....	90
第三节 直流锅炉的蒸发受热面.....	102
第四节 过热器与再热器.....	110
<b>第六章 汽轮机本体结构及工作过程</b> .....	119
第一节 汽轮机概述.....	119
第二节 汽轮机的本体结构.....	121
第三节 汽轮机的级内工作过程.....	134

第四节	汽轮机的级内损失和效率·····	143
第五节	多级汽轮机及其热经济性指标·····	147
<b>第七章</b>	<b>汽轮机辅助设备及系统·····</b>	<b>154</b>
第一节	凝汽设备及系统·····	154
第二节	给水回热加热系统·····	162
第三节	除氧设备及运行·····	165
第四节	汽轮机调节系统·····	168
<b>第八章</b>	<b>电厂热力系统及热经济指标·····</b>	<b>184</b>
第一节	发电厂原则性热力系统·····	184
第二节	主蒸汽与再热蒸汽系统·····	192
第三节	中间再热机组旁路系统·····	194
第四节	主凝结水系统·····	197
第五节	除氧给水系统·····	200
第六节	电厂全面性热力系统·····	204
第七节	凝汽式发电厂的主要热经济指标·····	205
第八节	单元机组的启动与停运·····	206
<b>第九章</b>	<b>核电厂工作原理与系统·····</b>	<b>211</b>
第一节	原子核物理基本知识·····	211
第二节	核裂变反应堆原理及分类·····	216
第三节	压水反应堆本体结构·····	219
第四节	压水反应堆冷却剂系统·····	227
第五节	专设安全设施·····	237
第六节	二回路系统·····	240
<b>参考文献</b>	·····	<b>244</b>

# 第一章 概 述

## 一、能源来源及能源分类

能源是人类生存和生产所必需的物质基础和动力来源，是指可产生各种能量或可做功的物质的统称，也称能量资源或能源资源。

### 1. 能源来源

能源的初始来源主要有地球外天体辐射能、地球本身蕴藏的能源及星球引力产生的能源三个方面。

(1) 地球外天体辐射能。天体辐射能主要包括太阳辐射能及宇宙射线能，直接来自地球以外天体，这部分能源主要是太阳辐射能。目前，人类所利用能量的绝大部分都直接或间接地来自太阳，除了可以直接利用太阳的光和热外，太阳辐射能也是地球上多种能源的主要来源，各种植物通过光合作用把太阳能转变成化学能在植物体内储存下来。煤炭、石油、天然气、油页岩等化石燃料是埋藏在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的，实质上是由古代生物固定下来的太阳能。此外，水能、风能、波浪能和海流能等也都是由太阳能间接转换而来的。从数量上看，太阳能非常巨大，理论计算表明，太阳每秒钟辐射到地球上的能量相当于 500 多万吨标准煤燃烧时放出的热量，一年就有相当于 170 万亿 t 标准煤燃烧时放出的热量，现在全世界一年消耗的能量还不及它的万分之一。到达地球表面的太阳能只有千分之一左右被植物吸收，并转变成化学能储存起来，其余绝大部分都转换成热，散发到宇宙空间。此外，还有其他恒星或天体发射到地球上的各种宇宙射线的能量，但人类尚不能充分利用这部分能量。

(2) 地球本身蕴藏的能源。与地球内部热能有关的能源称为地热能。从地下喷出地面的温泉和火山爆发喷出的岩浆就是地热能的表現。地球可分为地壳、地幔和地核三层，它是一个大热库。从地面向下，随着深度的增加，温度也不断增高。地壳就是地球表面的一层，一般厚度为几千米至 70km 不等。地壳下面是地幔，它大部分是熔融状的岩浆，厚度约为 2900km。火山爆发一般是这部分岩浆喷出。地球内部为地核，地核中心温度为 2000℃ 左右。可见，地球上的地热资源储量也很大。按目前钻井技术可钻到地下 10 公里的深度，估计地热能资源总量相当于世界年能源消费量的 400 多万倍。即便是仅开采地下 3km 以内的地热资源，就可相当于燃烧 29 000 亿 t 标准煤所产生的能量。

地球本身蕴藏的能源还包括用于进行裂变反应和聚变反应的核能资源，核裂变能资源包括地壳中储藏的铀、钍等，核聚变能资源包括海洋中储藏的氘和地壳中储藏的锂等，这些物质在发生原子核反应时会释放出巨大能量。目前在世界各地运行的 400 多座核电厂都是使用铀原子核裂变时放出的热量。使用氘、氚等轻核聚变时释放能量的核电技术正在研究之中。世界上已探明的铀储量约为 490 万 t，钍储量约为 275 万 t，这些裂变燃料足够人类使用到迎接聚变能的到来。聚变燃料主要是氘和氚，海水中氘的含量为 0.03g/L，据估计地球上的海水量约为  $1.38 \times 10^{18} \text{ m}^3$ ，所以世界上氘的储量约为 40 万亿 t；地球上天然存在的氚极少，

但可用锂来制造氘，地球上锂的储量超过 2000 亿 t。按目前世界能源消费水平计算，地球上可供原子核聚变的氘和氚，能供人类使用上千亿年。因此，只要解决可控核聚变技术，人类就能从根本上解决能源问题。

(3) 星球引力产生的能源。星球引力产生的能源是指由于地球、月亮、太阳之间有规律的运动，造成相对位置周期性地变化，它们之间产生的引力使海水涨落而形成潮汐能。与上述两类能源相比，潮汐能的数量很小，全世界的潮汐能折合成标准煤约为每年 30 亿 t，而实际可用的只是浅海区那一部分，每年约折合 6000 万 t 标准煤。

## 2. 能源分类

(1) 按照能源的获得方式不同，可分为天然能源和人工能源，也称一次能源和二次能源。以现成的形式存在于自然界的、可供直接利用的能源称为一次能源，如原煤、原油、天然气、太阳能、水能、风能、生物质能、油页岩、海洋能、地热能以及核能资源。由一次能源经过直接或间接加工转换而来的能源称为二次能源，如电能、煤气、焦炭、蒸汽以及由石油提取出来的各种成品油类等。二次能源使用方便，是高品质的能源，尤其是电能已经成为人类生活和生产不可或缺的能源。

(2) 按照能源是否能够循环再生，可将一次能源分为可再生能源和非再生能源。可再生能源是指在自然界中可以循环再生并有规律得到补充的能源，包括太阳能、水能、风能、生物质能、海洋能和地热能等。非再生能源是指经过长时间逐渐形成的、使用后短期内无法再生的能源，包括原煤、原油、天然气、油页岩和核能等。随着人类的不断开发和利用，其数量将越来越少。

## 3. 能源储量

根据“BP 世界能源统计年鉴 2015”，截至 2014 年年底，世界石油探明储量为 1.700 1 万亿桶，只能满足 52.5 年的全球生产需求。在过去的十年中，世界石油探明储量上涨了 24%，即超过 3300 亿桶。中国石油探明储量 185 亿桶，占世界总量的 1.1%，储产比为 11.9 年。

截至 2014 年年底，世界天然气探明储量为 187.1 万亿  $\text{m}^3$ ，储产比为 54.1 年，相比截至 2013 年年底的数据，2014 年探明储量上升了 0.3%。中国天然气探明储量 3.5 万亿  $\text{m}^3$ ，占世界总量的 1.8%，储产比为 25.7 年。

截至 2014 年年底，世界煤炭探明储量 8915.31 亿 t，可以满足 110 年的全球生产需求，是目前为止化石燃料中储产比最高的燃料。中国煤炭探明储量 1145 亿 t，其中无烟煤和烟煤 622 亿 t，次烟煤和褐煤 523 亿 t，占世界煤炭资源总量的 12.8%。中国是世界上煤炭生产和消费最多的国家，储产比仅为 30 年。

## 4. 我国电力装机容量及发电量

根据中国电力企业联合会 2015 电力工业统计，截至 2015 年年底，我国电力总装机容量为 150 673 万 kW。其中火力发电 99 021 万 kW（燃煤火电 88 419 万 kW、燃气火电 6637 万 kW），占总装机容量的 65.7%（燃煤和燃气火电分别占总装机的 58.7% 和 4.4%）；水电 31 937 万 kW，占总装机容量的 21.2%；核电 2717 万 kW，占总装机容量的 1.8%；风电 12 830 万 kW，占总装机容量的 8.5%；太阳能发电 4158 万 kW，占总装机容量的 2.8%。从发电量来看，2015 年年底，我国总发电量 56 045 亿 kWh，其中火电 40 972 亿 kWh（燃煤火电 37 649 亿 kWh、燃气火电 1658 亿 kWh），占总发电量的 73.1%（燃煤和燃气火电分



别占总发电量的 67.2%和 3.0%)；水电 11 143 亿 kWh，占总发电量的 19.9%；核电 1695 亿 kWh，占总发电量的 3.0%；风电 1851 亿 kWh，占总发电量的 3.3%；太阳能 383 亿 kWh，占总发电量的 0.7%。

从以上数据可以看出，我国常规化石能源储产比都远低于世界先进水平，也就是说能源资源相对匮乏。我国电力生产主要依靠燃煤火力发电，年发电动力煤消耗较大，由此带来的酸雨、温室效应、大气粉尘等主要环境污染问题也不可避免，但我国相当长的时间内以煤电为主的电力生产格局难以改变。因此，我国电力工业发展的主要方向：一是提高占比最大的燃煤火力发电机组能量转换效率，通过采用高参数、大容量机组来降低发电煤耗率，达到节能及环境保护的目的；二是逐步改变电力生产格局，降低燃煤发电装机及发电量的比例，提高清洁能源（如核能、风能、水能、太阳能）等的发电比例，使我国电力工业得以健康、可持续发展。

## 二、电能的主要生产方式及电厂生产过程

电能是将各种一次能源通过不同方式转换而成的二次能源，是目前人类生活和生产中广泛应用的能源方式。具有一定生产规模、能连续不断地对外界提供电能的工厂称为发电厂（又称发电站）。根据一次能源种类和转换方式的不同，可将发电厂分为火力发电厂（简称火电厂）、水力发电厂（简称水电厂）、风力发电厂（简称风电厂）、原子能发电厂（简称核电厂）和太阳能发电厂等主要类型。目前世界上已形成规模，并已大批量投入商业运营的发电厂主要是火电厂、水电厂、核电厂和风电厂。

本课程的主要任务是介绍火力发电厂所涉及的能量转换基本规律、能量转换原理、能量转换所需热力设备及其系统，以及火电厂热力设备的运行等有关知识，并简要介绍核电厂的基本工作原理、主要设备及系统。

### 1. 火力发电厂主要系统及工作过程

火力发电厂是利用煤炭、石油、天然气或其他矿物燃料的化学能生产电能的工厂。虽然火电厂的燃料不同，但基本能量转换过程均为：燃料的化学能→工质的热能→转子旋转的机械能→电能。由于我国火力发电厂主要以燃煤发电为主，本书主要介绍燃煤火力发电机组的相关设备系统、工作原理及运行特性。

燃烧煤粉的火力发电厂由三大主机及其系统组成，即锅炉设备及系统、汽轮机设备及热力系统、发电机设备及系统，其生产过程如图 1-1 所示。

煤通过车、船等运进发电厂储煤场，经碎煤设备初步粉碎后，由带式输送机送入锅炉车间的原煤仓。原煤仓中的煤经给煤机送入磨煤机磨制成煤粉。由空气预热器加热热空气，把磨煤机磨制好的煤粉送入粗粉分离器，分离出的不合格煤粉返回磨煤机继续研磨，而合格煤粉由空气携带进入细粉分离器进行空气和煤粉分离，大部分煤粉落入煤粉仓，携带少量极细煤粉的空气（称为乏气）由细粉分离器顶部引出，经排粉机提升压力后，与给粉机送入一次风管道的煤粉混合，煤粉空气混合物由燃烧器喷入炉膛着火燃烧。有些火电厂不设煤粉仓，而是将煤粉与空气的混合物直接送入炉膛内燃烧。

送风机从环境中吸入空气并将其送入空气预热器，进一步吸收烟气余热，以减小排烟热量损失，并提高空气温度、改善燃烧过程。炉膛内燃烧产生的高温烟气，在引风机作用下，沿锅炉本体的烟道依次流过炉膛水冷壁、过热器、省煤器和空气预热器等换热设备，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气等介质，这些换热设备统称为受热面。除空气预热器是用来加热

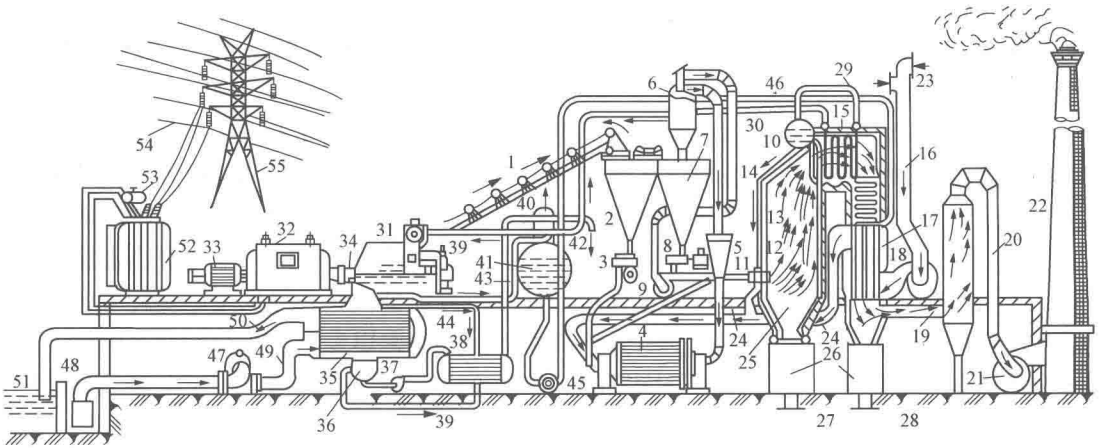


图 1-1 火电厂生产过程

- 1—带式运输机；2—原煤仓；3—给煤机；4—磨煤机；5—粗粉分离器；6—旋风分离器；7—煤粉仓；  
 8—给粉机；9—排粉机；10—汽包；11—燃烧器；12—炉膛；13—水冷壁；14—下降管；15—过热器；  
 16—省煤器；17—空气预热器；18—送风机；19—除尘器；20—烟道；21—引风机；22—烟囱；  
 23—送风机的吸风口；24—热风道；25—冷灰斗；26—除灰设备；27—冲渣沟；28—冲灰沟；  
 29—饱和蒸汽管；30—主蒸汽管；31—汽轮机；32—发电机；33—励磁机；34—排汽口；35—凝汽器；  
 36—热井；37—凝结水泵；38—低压加热器；39—低压加热器疏水管；40—除氧器；41—除氧水箱；  
 42—化学补充水入口；43—汽轮机第一级抽汽；44—汽轮机第二级抽汽；45—给水泵；46—给水管道；  
 47—循环水泵；48—吸水滤网；49—冷却水入水管；50—冷却水出水管；51—冷水池或江河；  
 52—主变压器；53—油枕；54—输电线路；55—输电铁塔

燃烧所需空气的受热面外，其余都是用来加热汽和水的受热面，称为汽水受热面或锅内受热面。放热降温后的烟气流入除尘器进行除尘净化，最后由引风机（吸风机）抽出，经脱硫脱硝装置降低污染气体浓度后由烟囱排入大气。由送风机克服空气侧阻力，引风机克服烟气侧阻力，这种通风方式称为平衡通风。电厂煤粉锅炉都采用平衡通风方式，炉膛和烟道压力为微负压。燃料燃烧时，从炉膛内落下的灰渣、从尾部烟道落入空气预热器下面灰斗中的飞灰以及除尘器收集的飞灰，通常用水冲入冲渣沟和冲灰沟，并随冲灰水流向灰渣泵房，然后由灰渣泵、灰渣管等设备排入储灰场。目前，出于对环保的考虑，避免灰场产生二次污染，火电厂多采用干式排渣及除灰，有利于灰渣的综合利用，减轻对环境的污染。

锅炉给水在省煤器中吸收烟气热量升温后送入汽包，经下降管进入炉膛内的水冷壁下联箱，然后沿水冷壁向上流动。锅炉给水在水冷壁中吸热后开始汽化并产生蒸汽。由于下降管和水冷壁内工质存在密度差，汽水混合物自动上升进入汽包，并进行汽水分离。水在下降管、水冷壁和汽包中连续循环，不断汽化，在汽包的上部分离出的饱和蒸汽，被送入过热器系统继续吸收烟气热量，达到规定参数的过热蒸汽由主蒸汽管道送入汽轮机做功。

具有一定温度和压力的蒸汽在汽轮机内将蒸汽热能转换成机械能，推动汽轮机转子并带动同轴的发电机转子旋转，在励磁机作用下产生电能。蒸汽在汽轮机内做功时，其温度和压力将逐步降低。蒸汽从排汽口排出之前，有部分被抽出，分别用于加热回热加热器和除氧器中的水。做功后从排汽口排出的蒸汽称之为排汽（乏汽）。对于凝汽式汽轮发电机组，为了使蒸汽在汽轮机内尽可能多地做功，提高热效率，其排汽均被送入压力很低的凝汽器。

凝结水泵将凝汽器热井中的水（主凝结水）送入低压回热加热器；主凝结水在各级低压加热器吸收汽轮机低压抽汽的热量，温度升高后送入除氧器，继续被加热并除去溶解于水中的氧气和其他不凝结的气体，以避免其对金属的腐蚀。从除氧器下部水箱出来的水被送入给水泵，经给水泵升压后的水称为主给水，主给水在各级高压加热器吸收汽轮机高压抽汽的热量，温度升高后送入锅炉的省煤器。

为了维持高度真空，凝汽器需要大量的冷却水将汽轮机排汽的热量带走，并使蒸汽凝结，冷却水又称为循环水。循环水泵将来自江河、湖泊、海洋、人工水库或冷水池中的水加压，并送入凝汽器。冷却水历经凝汽器后，将汽轮机排汽的热量带走，由出水室回到冷却水源。

发电机直接由汽轮机带动，发电机所发出的绝大部分电能由主变压器升压后，经高压配电装置和输电线路向外供电。

综上所述，燃煤火力发电厂是由锅炉的制粉系统、燃烧系统、汽水系统、风烟系统和除灰除渣系统，汽轮机的本体设备、凝汽系统、回热系统和给水除氧系统，以及发电机相关设备组成。

## 2. 核电厂系统组成及其工作过程

重核分裂和轻核聚合时，都会放出巨大的能量，这种能量统称为“核能”，即通常所说的原子能。人类利用核能发电始于 20 世纪 50 年代，目前大量投入商业运营的核电厂都是利用重核裂变产生的裂变能，技术上已比较成熟，可控的轻核聚变发电技术仍处于试验探索阶段。

利用重核裂变释放能量发电的核电厂，从能量转换观点分析，是由重核裂变能→热能→机械能→电能的转换过程。由于重核裂变的强辐射特性，已投入运营和在建的核电厂，毫无例外地划分为核岛部分和常规岛部分，用安全防护设施严密分隔开的两部分，共同构成了核电厂的动力部分，如图 1-2 所示。

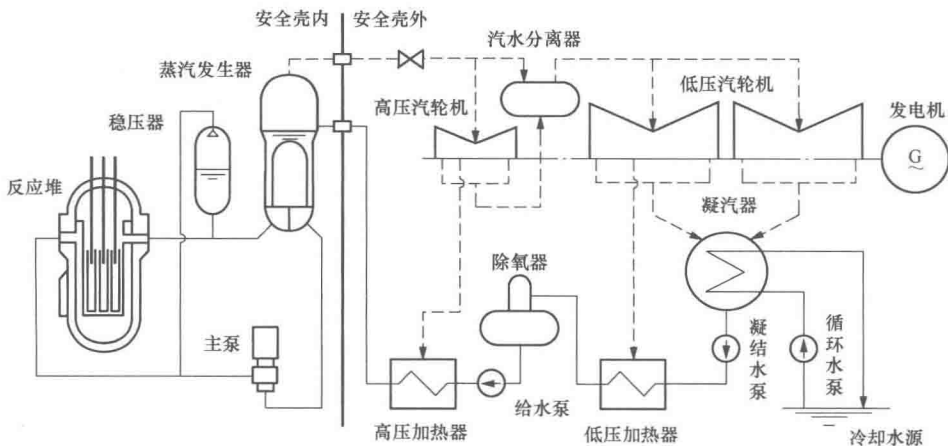


图 1-2 压水堆核电厂生产过程

核岛部分包括压力容器（压力壳）、蒸汽发生器、冷却剂泵（主泵）和稳压器等主要设备。放置在压力容器内的反应堆堆芯是裂变能释放的主要场所，其功能相当于火力发电厂的锅炉设备。目前世界上采用最多的反应堆类型为压水反应堆（简称压水堆），由核燃料、慢

化剂、冷却剂、控制棒、反射层等组成。由铀燃料棒和控制棒组成的堆芯，严格按技术要求装配，浸没在充满慢化剂和冷却剂的压力壳内。通过压力壳上部布置的控制棒组件，控制铀-235 进行平稳连续的裂变反应过程，实现堆内可控的铀裂变能到热能的转变。

冷却剂由主泵升压后，高压冷却剂自下而上流过堆芯，对堆芯进行有效冷却同时温度升高，高温冷却剂由管道输送至蒸汽发生器，与蒸汽动力部分返回的给水进行热量交换，冷却后离开蒸汽发生器，由主泵再返回堆芯继续带走堆芯产生的热量。稳压器起到维持冷却剂压力的作用，冷却剂在反应堆、蒸汽发生器、主泵中形成循环流动，称为核电厂的一回路系统（冷却剂系统），其内部介质和设备，都带有较强的放射性。重核裂变产生的热能不断由循环流动的冷却剂带出堆芯，并在蒸汽发生器内把来自蒸汽动力部分的给水加热成具有一定压力和温度的饱和蒸汽（或微过热蒸汽）。核电厂蒸汽动力部分与常规火力发电厂基本一致，称为二回路系统。工作流程为：蒸汽发生器→汽轮机→凝汽器→凝结水泵→低压加热器→除氧器→给水泵→高压加热器→蒸汽发生器，从而使工作介质实现循环流动。两个独立循环回路系统内的工质，经蒸汽发生器进行换热，完成核电厂的能量转换。同时，蒸汽发生器也是一、二回路的隔绝设备，避免一回路放射性物质进入二回路，二回路可以不用辐射屏蔽防护。

由于反应堆的功率不同，所用慢化剂和冷却剂的参数不同，核电厂反应堆的类型、结构和运行特点也各不相同。另外，核电厂的反应堆控制、对有害放射性的屏蔽和防护措施等，也远比火力发电厂复杂，且具有更高的要求。本书第九章将针对目前普遍采用的压水堆核电厂动力部分设备结构，工作原理，一、二次系统布置及运行等问题，进行概括性的分析和阐述。

### 三、我国电力工业现状与发展简述

在新中国建立初期，我国电力装机容量只有 173 万 kW。改革开放初期，发展到 5800 万 kW。1987 年突破 1 亿 kW，2000 年突破 3 亿 kW。自 2002 年开始，在市场需求和体制创新的推动下，电力工业实现跨越式发展，装机容量快速增长。同时，电源结构正在逐步趋向合理，形成了火电、水电、风电、核电等各种发电方式多样化的电力生产结构。特别是在当前我国经济快速发展导致生态环境急剧恶化的情况下，节能环保的新能源发电得到了大力发展。2015 年我国风电装机容量已经突破 1 亿 kW，核电建设进入广泛采用第三代高冗余安全的核电机组的快速发展期，火电结构调整也取得了实质性进展，实现了电力建设从追求数量发展到注重质量的转变。

燃煤火力发电是我国主要发电方式，2015 年占总装机容量的 58.7% 和发电量的 67.2%。当前随着我国经济发展进入转型期以及经济结构的调整，电力生产已经出现过剩，火电、水电和核电利用小时数都出现下滑，2015 年火电机组年均利用小时数下降至 3969h。当前火力发电面临最大的挑战是优化火力发电机组结构，加快关停小火电，建设发展高效超临界大型机组，降低发电煤耗率，实现结构调整。

近几年，随着不断消化和吸收世界的先进技术，采用自主研发与引进技术合作相结合，火电机组设计制造技术快速发展，从 350、600MW 超临界压力机组，向 660MW 和 1000MW 高效超临界技术过渡，新建项目中 660MW 以上的高效超临界压力机组建设已经成为主流。与此同时，随着对火力发电零排放的环保要求和环保技术的不断进步，新型低污染燃烧技术和烟气排放控制技术及应用广泛应用于火力发电厂的生产过程。2015 年年底，实

施脱硫的机组占全国燃煤发电机组容量的 92.8%，采用脱硝的机组达到全国燃煤发电机组容量的 95%。我国电力生产正向高效、低耗和环保的发展方向快速迈进，开创了电力生产的全新局面。

核电以其无污染气体、温室气体及粉尘排放等优势，对于我国日益严重的环境问题，起到很大的缓解作用。虽然受到福岛核事故的影响，我国核电发展仍呈现快速发展趋势，这对于我国的环境保护和改变能源消费格局及电力生产格局都具有很大意义。我国核电起步较晚，但发展较快。1991 年投产了具有完全自主知识产权的秦山核电站一期 300MW 压水堆核电机组，1994 年正式运营引进技术的广核集团大亚湾核电站 900MW 压水堆机组，此后陆续建成了岭澳核电站、田湾核电站、秦山核电站三期工程、阳江核电站、红沿河核电站、宁德核电站等主要核电基地。按照我国核电中长期发展规划目标，到 2020 年，运行核电装机容量将达到 5800 万 kW，在建 3000 万 kW 左右。

我国第一个高温气冷堆示范工程项目——山东荣成石岛湾核电站，目前仍在建设之中，计划 2017 年首台机组建成发电。引进美国西屋公司第三代核电技术 AP1000 的海阳核电、三门核电规划建设项目均为  $6 \times 1250$  MW 压水堆核电机组，海阳核电 1、2 号机组预计 2016 年建成发电，三门核电 1、2 号机组预计 2017 年发电。引进欧洲第三代核电技术 EPR1000 压水堆核电技术的广东台山核电站，项目规划一期建设 2 台核电机组，单机容量为 1750MW，为世界单机容量最大的核电机组，并致力打造成为国际 EPR 标杆工程。1、2 号机组已于 2009 年 9 月 1 日和 2010 年 4 月 15 日分别开工，1 号机组预计 2017 年发电。在我国 30 余年核电科研、设计、制造、建设和运行经验的基础上，中国两大核电企业中国核工业集团公司和中国广核集团根据福岛核事故经验反馈以及全球最新安全要求，研发了先进百万千瓦级压水堆核电技术“华龙一号”，该示范项目福清 5 号机组已正式开工建设，标志着我国的核电事业已走在世界前列。

## 第二章 热工基础及流体流动基础知识

### 第一节 热力学基本概念与基本定律

#### 一、热力学基本概念

##### (一) 工质与热力系统

热机是将热能转换为机械能的设备，如火力发电厂中的汽轮机。热能与机械能之间的转换是通过媒介物质在热机中的一系列状态变化过程来实现的，这种媒介物质称为工质。工质一般具有良好的流动性和膨胀性，在火力发电厂中用水作为工质。

在热力学中分析一个现象或过程时，通常将研究对象通过边界与周围有关的其他物质分隔，这种人为分隔出来的研究对象称为热力系统。热力系统以外的其他有关物质统称为外界。按照热力系统与外界之间进行物质交换和能量交换的情况，可以将热力系统分为四种类型。

闭口系统：与外界之间不存在物质交换的系统，如图 2-1 所示；

绝热系统：与外界之间不存在热交换的系统；

开口系统：与外界之间既存在物质交换，也存在能量交换的系统，如图 2-2 所示；

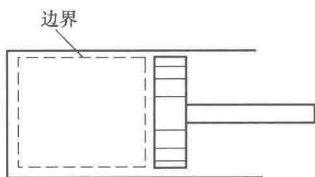


图 2-1 封闭热力系统

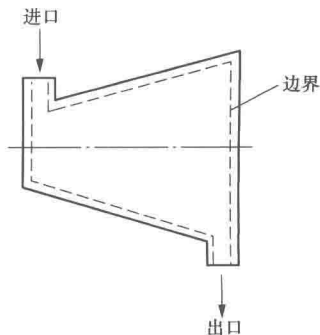


图 2-2 开口热力系统

孤立系统：与外界之间既无物质交换，也无能量交换的系统。

与外界仅有热量的交换，且有限热量的交换不引起系统温度变化的热力系统称为热源，可分为高温热源和低温热源。向系统提供热量的热源称为高温热源（简称热源），接收系统放热的热源称为低温热源（又称冷源）。

##### (二) 热力学状态与状态参数

###### 1. 热力学状态及热力过程

(1) 热力学状态。热力系统中工质在某一瞬间所呈现的物理状态。在外界条件不变的情况下，即使经历较长时间，系统的宏观特性仍不发生变化的热力学状态称为平衡状态。

(2) 热力过程。系统由其初始平衡态经过一系列中间状态达到某一新平衡态的变化过程

称为热力过程，简称过程。系统完成某一过程之后，若能够沿原路径返回其初始平衡态，且使相互作用中涉及的外界也恢复到原来状态，而不留下任何变化，则该过程称为可逆过程。不满足上述条件的过程称为不可逆过程。

(3) 热力循环。系统经历了若干不相重复的过程，最后又回到初始状态所形成的封闭过程称为热力循环，简称循环。

## 2. 状态参数

热力学参数通常称为状态参数，是描述系统所处状态的物理量。一般用两个相互独立的状态参数就可以确定系统的一个状态。

状态参数大致可以分为基本参数和导出参数两种，前者可以直接测量而得，如温度、压力、比体积等；后者一般不能直接测量，只能用基本参数依据某种关系推导而得，如热力学能、比焓、比熵等。

(1) 温度。温度是标志物体冷热程度的物理量。处于热平衡态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。被测物体达到热平衡时，温度计的温度即为被测物体的温度。

温度主要有摄氏温标和热力学温标两种表示方法。

国际单位制采用热力学温标为基本温标。热力学温标采用水的三相点（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 273.15K。用该温标确定的温度称为热力学温度，符号为“ $T$ ”，单位为“开尔文”，简称“开”，用符号“ $K$ ”表示。

摄氏温标确定的温度称为摄氏温度，用符号“ $t$ ”表示，单位为“摄氏度”，用符号“ $^{\circ}C$ ”表示。

两种温标没有本质区别，只是零点取值不同。热力学温度等于 0K 称为绝对零度，热力学温度 273.15K 为摄氏零度，摄氏温度与热力学温度之间关系为

$$t = T - 273.15 \quad (2-1)$$

(2) 压力。单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。绝对压力是指工质的真实压力，以  $p$  表示。绝对压力大于大气压力（用  $p_{amb}$  表示）时，压力表所测出的超出大气压力之值称为表压力，以  $p_g$  表示， $p = p_{amb} + p_g$ 。

当容器内的绝对压力低于大气压力时，例如凝汽器内、负压锅炉炉膛内，测压仪表指示的读数低于大气压力之值习惯上称为负压或真空度，以  $p_v$  表示， $p = p_{amb} - p_v$ 。真空越高，表明容器内的绝对压力越低。图 2-3 表明了绝对压力、表压力、真空度与大气压力之间的关系。大气压力  $p_{amb}$  的值可用气压计测定，其值随测量的时间、地点而异。只有绝对压力才能作为状态参数，而表压力或真空度的数值将因当地大气压力不同而随之改变。

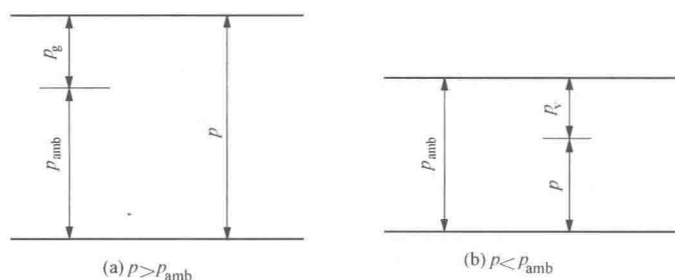


图 2-3 绝对压力、表压力、真空和大气压力之间的关系

在国际单位制中，压力的单位是  $\text{N}/\text{m}^2$ ，称为帕斯卡，简称“帕”，用符号“Pa”表示。工程上因以 Pa 为压力单位太小，计算不方便，常取 kPa（千帕）和 MPa（兆帕）作为实用单位， $1\text{MPa}=10^3\text{kPa}=10^6\text{Pa}$ 。

物理学上还规定，压力为一个标准大气压（ $1\text{atm}=101\,325\text{Pa}$ ）、温度为  $0^\circ\text{C}$  时的状态，称为标准状态。工程计算中，标准大气压力可近似取  $p_{\text{amb}}=1\times 10^5\text{Pa}$ 。

(3) 比体积。单位质量的工质所占有的体积称为比体积，又称比容，用符号  $v$  表示，即

$$v = \frac{V}{m} \text{m}^3/\text{kg} \quad (2-2)$$

式中  $V$ ——工质占有的体积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——工质的质量，kg。

(4) 理想气体状态方程。在平衡状态下，系统的某一状态参数和独立于它的其他状态参数之间有着确定的联系，将这种联系表达出来的数学方程式称为状态方程。在工质的热力学性质中，压力  $p$ 、比体积  $v$  和温度  $T$  之间的关系具有特别重要的意义。对于实际气体，三个基本状态参数的关系比较复杂。但对密度较小，处于平衡状态的气体物质，基本状态参数之间近似保持一种简单关系，即理想气体模型：把分子视为忽略体积的质点；认为气体分子是弹性碰撞，分子之间无作用力。根据物理学相关定律，可得理想气体状态方程，即

$$pv = R_g T \quad (2-3)$$

式中  $R_g$ ——气体常数， $R_g = \frac{R}{M}$ ， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

$R$ ——摩尔气体常数， $R=8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

$M$ ——摩尔质量。

## 二、热力学第一定律

### (一) 功和热量

从微观上说，系统内能是构成系统的所有分子无规则热运动动能（内动能）、分子间相互作用势能（内位能）、分子内部以及原子核内部各种微观能量的总和，称为热力学能，用符号  $U$  表示，单位为 J。单位质量物质的热力学能称为比热力学能，用符号  $u$  表示，单位为  $\text{J}/\text{kg}$ 。在无化学反应和原子核反应的过程中，热力学能的变化只有内动能和内位能的变化。温度的高低反映内动能大小，工质的温度高，内动能就大。分子的内位能取决于分子间的平均距离，即取决于工质的比体积。工质的热力学能取决于它的温度和比体积，即取决于工质所处的状态。因此热力学能也是一个状态参数，可以表示为两个独立参数的函数，即

$$u = f(T, v) \quad (2-4)$$

热力学能和机械能是不同形式的能量，但是可以同时存储在热力系统内。人们把内部储能和外部存储能的总和，即热力学能和机械能（包括宏观运动动能  $\frac{1}{2}mc^2$  及位能  $mgz$ ）的总和，称为工质的总储能，简称总能，用  $E$  表示，即

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz \quad (2-5)$$

热力学能是热力状态的单值函数，要找到一个没有运动而热力学能为绝对零值的基点是不可能的。工程计算中，关心的是热力学能的相对变化量  $\Delta U$ ，所以实际可以任意选取某一



状态的热力学能为零值，作为计算基准。

能量从一个物体传递到另一个物体有两种方式：一种是做功，另一种是传热。

力与沿着力的作用方向位移的乘积称为功，用符号  $W$  表示，单位为 J 或 kJ。热力学中重点讨论与气体体积变化有关的功，即体积功，包括膨胀功和压缩功两种形式。若气体膨胀则称热力系统对外界做了膨胀功；反之，称外界对热力系统做了压缩功。单位质量的工质由于体积变化做的功称为比体积功，用符号  $w$  表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg。

由于热力系统与外界之间或热力系统内各部分之间存在温差而交换的能量称为热量，用符号  $Q$  表示，单位为 J 或 kJ。热量和功一样是过程中能量传递或转换的度量，属于过程量。单位质量的工质与外界交换的热量称为比热量，用  $q$  表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg。如果热力系统从外界吸热，此时定义热量为正值；反之，则表示热力系统向外界放热，定义热量为负值；若热力系统与外界无热量交换，则经历的过程为绝热过程。

### (二) 热力学第一定律的实质与表述

热力学第一定律是能量转换及守恒定律在热现象上的应用，在热力学中着重研究热能与机械能的转换。

热力学第一定律有以下两种表述方式：

(1) 热可以变为功，功也可以变为热。一定量的热消失时，必产生与之数量相当的功；消耗一定量的功时，也必出现相应数量的热。任何一个系统，输入系统的能量减去输出系统的能量，等于系统储存能量的增加。

(2) 对任何一个系统，输入系统的能量减去输出系统的能量，等于系统储存能量的增加。

### (三) 热力学第一定律基本方程

热力学第一定律的能量方程就是系统变化过程中的能量平衡方程，是分析状态变化过程的根本方程，可以从系统在状态变化过程中各项能量的变化和它们的总量守恒这一原则导出。把热力学第一定律应用于系统中的能量变化时，可写成如下形式：

进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统中储存能量的增加 (2-6)

式 (2-6) 是系统能量平衡的基本表达式，任何系统任何过程均可据此原则建立其能量守恒关系。对于闭口系统，进入和离开系统的能量只包括热量和做功两项；对于开口系统，因有物质进出分界面，进入系统的能量和离开系统的能量除了以上两项外，还有随同物质带进带出系统的能量。

#### 1. 热力学第一定律解析式

图 2-4 为具有多股热量 ( $Q_i, i = 1 \sim n$ ) 和功 ( $W_i, i = 1 \sim n$ ) 输入和输出的变化结果，系统内储存能量由  $E_1$  变为  $E_2$ ，按照热力学第一定律，可表示为

$$Q_1 + Q_2 + W_3 - Q_3 - W_1 - W_2 = E_2 - E_1 \quad (2-7)$$

$$Q - W = \Delta E \quad (2-8)$$

对于单位质量工质可以表示为

$$q = w + \Delta e \quad (2-9)$$

对于一个微元过程，其微分表达形式为

$$dQ = dE + dW \quad (2-10)$$

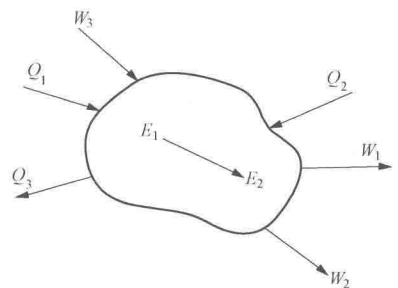


图 2-4 多输入和多输出的系统示意