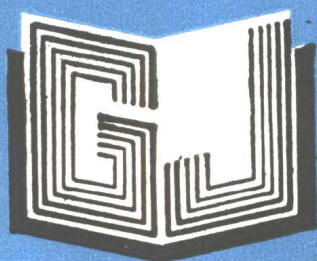


992151



高等学校教材

专科适用

# 热力发电厂

长沙电力学院 程明一  
沈阳电力高等专科学校 阎洪环 合编  
上海电力学院 石奇光



# 高等学校教材

..... 专 科 适 用 .....

## 热 力 发 电 厂

长 沙 电 力 学 院 程 明 一  
沈 阳 电 力 高 等 专 科 学 校 阎 洪 环 合 编  
上 海 电 力 学 院 石 奇 光

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书主要阐述大、中型热力发电厂工作过程的基本原理、热力计算及运行的基本知识,着重介绍发电厂的热经济性,发电厂热力循环的型式和参数,给水回热加热系统,给水除氧系统,发电厂的经济性及供热系统,发电厂的原则性热力系统,发电厂的全面性热力系统,发电厂的汽水管道,发电厂的经济运行等内容;本书还对发电厂辅助生产系统,发电厂的燃料供应、排烟除尘、除灰、供水以及发电厂的环境保护和综合利用等作了一般介绍。

本书可作为电力高等专科学校电厂热能动力专业和火电厂集控运行专业的教材,也可作为电力职工大学、高等院校成人教育、夜大和函授大学有关专业的教材,并可供有关专业技术人员自学或参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂/程明一等编.-北京:中国电力出版社,  
1998

高等学校教材·专科适用

ISBN 7-80125-468-6

I. 热… II. 程… III. 热电厂-高等学校-教材  
IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19189 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 432 千字 1 插图

印数 0001—5780 册 定价 17.80 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)

## 前 言

本书是根据原能源部教育司 1990 年 1 月发布的由高等学校热能动力类专业教学委员会专科教学组制订的电厂热能动力工程专业和火电厂集控运行专业热力发电厂课程的基本要求而编写的。

本书阐明了大、中型热力发电厂热力部分生产过程的基本原理,分析了其热经济性,论述了发电厂热力设备及其系统的技术经济分析、计算和运行的基本知识。本书还对典型发电厂热力系统作了必要的定性和定量分析,以常规热力计算为主,简要介绍一些新的计算方法,以培养学生综合分析和解决生产问题的能力。本书的取材以国内大型机组和实用技术为主,适当介绍引进机组和国外资料,以扩大学生的视野和知识面。各章均附有复习思考题,以帮助学生思考和加深巩固所学知识。

全书由长沙电力学院程明一、沈阳电力高等专科学校阎洪环、上海电力学院石奇光合编,其中绪论、第四、第六、第十章由程明一编写,第七、第八、第九章由阎洪环编写,第一、第二、第三、第五章由石奇光编写,全书由程明一统稿,东南大学汪孟乐教授主审。在编写过程中,上海电力学院褚松老师做了大量前期工作,长沙电力学院余秉彬老师在定稿时提出了一些建设性意见,另外各兄弟院校、电力设计院、制造厂和有关火电厂给予大力协助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1997 年 8 月

3-10-9/06

## 主要符号

<p><i>A</i> 循环的动力系数; 面积, <math>\text{cm}^2</math>、<math>\text{m}^2</math>; 直管壁厚 负偏差系数; 传质面积, <math>\text{m}^2</math></p> <p><i>a</i> 制粉系统中进入平均含粉尘量, <math>\text{g/h}</math></p> <p><i>B</i> 燃料量, <math>\text{kg/h}</math>、<math>\text{t/h}</math>、<math>\text{t/a}</math></p> <p><i>b</i> 燃料消耗率, <math>\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})</math>; 气体在水中的溶 解量, <math>\text{mg/L}</math></p> <p><i>c</i> 比热容, <math>\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math>; 管子壁厚附加值, <math>\text{mm}</math>; 制粉系统中离开平均含粉尘量, <math>\text{g/h}</math></p> <p><i>D</i> 汽水流量, <math>\text{kg/s}</math>、<math>\text{kg/h}</math>、<math>\text{t/h}</math>、<math>\text{t/a}</math>; 管子内外 径, <math>\text{mm}</math></p> <p><i>d</i> 汽耗率, <math>\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})</math>; 管道直径, <math>\text{mm}</math>、<math>\text{cm}</math></p> <p><i>E</i> 焓, <math>\text{kJ/kg}</math>; 弹性模数, <math>\text{N/m}^2</math></p> <p><i>e</i> 比电, <math>\text{kJ/kg}</math>; 相对热化发电份额</p> <p><i>f</i> 负荷系数, %</p> <p><i>G</i> 水的重量流量, <math>\text{kg/h}</math>、<math>\text{t/h}</math>; 气体自水中离析 出来的量, <math>\text{mg/h}</math>; 粉尘量, <math>\text{kg/h}</math></p> <p><i>g</i> 重力加速度, <math>\text{m/s}^2</math></p> <p><i>H</i> 总焓降, <math>\text{kJ/kg}</math>; 压头, <math>\text{Pa}</math>; 高度, <math>\text{m}</math></p> <p><i>h</i> 比焓, <math>\text{kJ/kg}</math>; 小时</p> <p><math>\Delta h</math> 局部焓降, <math>\text{kJ/kg}</math></p> <p><i>K</i> 换热系数, <math>\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K})</math>; 投资费, 元, 传 质系数, <math>\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{MPa}\cdot\text{h})</math></p> <p><i>L</i> 管道展开总长度, <math>\text{m}</math></p> <p><i>m</i> 质量, <math>\text{kg}</math>; 阀门的开度, <math>\text{cm}</math>; 循环倍率</p> <p><i>n</i> 通风换气次数; 转速, <math>\text{r/min}</math></p> <p><i>P</i> 功率, <math>\text{kW}</math>、<math>\text{MW}</math>; 透过率, 100%</p> <p><i>p</i> 压力, <math>\text{N/m}^2</math>、<math>\text{Pa}</math>、<math>\text{MPa}</math></p> <p><i>Q</i> 热负荷, <math>\text{kJ/h}</math>、<math>\text{GJ/h}</math>、<math>\text{GJ/a}</math>; 燃料发热量, <math>\text{kJ}/</math> <math>\text{kg}</math>; 容积流量, <math>\text{m}^3/\text{h}</math></p> <p><i>q</i> 热耗率, <math>\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})</math>; 蒸汽凝结放热量, <math>\text{kJ}/</math> <math>\text{kg}</math></p> <p><i>q<sub>1</sub></i> 燃料的低位发热量, <math>\text{kJ/kg}</math></p> <p><i>R</i> 年计算费用, 元; 管子的等值粗糙度</p> <p><i>r</i> 能耗 (汽耗、热耗、燃料消耗) 微增率, <math>\text{kg}/</math> <math>(\text{kW}\cdot\text{h})</math>、<math>\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})</math>、<math>\text{t}/(\text{kW}\cdot\text{h})</math>; 疏水</p>	<p>放热量, <math>\text{kJ/kg}</math></p> <p><i>S</i> 熵, <math>\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math>; 年运行费用, 元; 壁厚, <math>\text{mm}</math></p> <p><i>s</i> 比熵 <math>\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math>; 壁厚, <math>\text{mm}</math></p> <p><i>T</i> 热力学温度, <math>\text{K}</math>; 时间, <math>\text{s}</math>、<math>\text{h}</math>、<math>\text{a}</math></p> <p><i>t</i> 摄氏温度, <math>^{\circ}\text{C}</math></p> <p><i>V</i> 容积, <math>\text{m}^3</math></p> <p><i>v</i> 比体积, <math>\text{m}^3/\text{kg}</math></p> <p><i>W</i> 功率, <math>\text{W}</math>、<math>\text{kW}</math>、<math>\text{MW}</math>; 发电量, <math>\text{kW}\cdot\text{h}</math>; 煤场 贮煤量, <math>\text{t}</math></p> <p><i>w</i> 比功, <math>\text{kJ/kg}</math></p> <p><i>x</i> 汽轮机组空载系数; 建筑物采暖特性, <math>\text{kJ}/</math> <math>(\text{m}^3\cdot\text{h}\cdot\text{K})</math></p> <p><i>Y</i> 抽汽作功不足系数</p> <p><i>Z</i> 给水回热加热级数</p> <p><i>a</i> 抽汽份额; 热化系数; 对流换热系数, <math>\text{kJ}/</math> <math>(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K})</math></p> <p><math>\beta</math> 排污率, %; 回热抽汽增大的汽耗系数</p> <p><math>\eta</math> 效率, %; 基本许用应力修正系数</p> <p><math>\theta</math> 上端差 (即加热蒸汽的饱和温度与其出口水 温之差), <math>^{\circ}\text{C}</math></p> <p><math>\lambda</math> 导热系数, <math>\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})</math>; 摩擦系数</p> <p><math>\rho</math> 密度, <math>\text{kg}/\text{m}^3</math></p> <p><math>\delta</math> 应力, <math>\text{N}/\text{mm}^2</math></p> <p><math>\tau</math> 给水焓升, <math>\text{kJ/kg}</math>; 时间, <math>\text{h}</math></p> <p><math>\psi</math> 减温减压器未蒸发水量占总喷水量的份额; 返回水率</p> <p><math>\omega</math> 供热循环电能生产率, <math>\text{kW}\cdot\text{h}/\text{GJ}</math>; 流速, <math>\text{m/s}</math></p> <p><math>\xi</math> 阻力系数</p> <p style="text-align: center;">上 角 标</p> <p><i>a</i> 年的</p> <p><i>c</i> 纯凝汽工况的</p> <p><i>d</i> 设计的</p> <p><i>i</i> 内部的</p> <p><i>n</i> 净的 (供电的); 公称的</p>
---	--

o 外部的  
 op 最佳的  
 r 回热循环的  
 rh 再热循环的  
 s 标准燃料的  
 t 计算温度的

### 下角标

a 理想的；基本许用应力的  
 amb 环境的  
 ap 厂用能量  
 e.ap 厂用电的  
 dap 厂用汽的  
 av 平均的  
 ax 轴端功率  
 b 锅炉的；基本的；基载的  
 c 卡诺循环的；凝汽汽流的；定压的  
 co 纯凝汽汽流的  
 cp 凝汽式发电厂的  
 d 除氧的  
 e 回热抽汽的，绝对的  
 ec 经济的  
 el 电功率  
 ej 抽气器  
 fw 给水的  
 g 发电机的  
 h 加热器；热耗的；供热的；采暖的  
 hs 热网的  
 hm 返回水与补充水混合的  
 i 内部；绝对的  
 in 进入的  
 l 泄漏的、损失的  
 le 外部工质损失  
 lu 门杆漏汽  
 M 最大的  
 m 机械的；最小的  
 ma 补充水的  
 n 空载  
 no 公称  
 o 外部；初始

out 流出的  
 p 定压；峰载；算术平均的  
 pu 给水泵的  
 r 额定；相对  
 rtp 减温减压后的  
 ri 相对内部的  
 rc 再循环  
 rh 再热循环  
 vt 热网回水温度  
 s 饱和水；蒸汽的；标准的  
 sg 汽封的  
 sp 过热蒸汽  
 su 热网送水温度  
 t 热的；温度的  
 th 节流，理论  
 to 总的  
 tp 热电厂  
 u 利用的；单元的  
 v 定容的；滑压的  
 w 水的

### 设备符号

AH 空气预热器  
 B 锅炉  
 BC 排污冷却器  
 BH 基载热网加热器  
 BP 升压泵  
 CC 凝汽器  
 CP 凝结水泵  
 CV 排污扩容器  
 DC 外置式疏水冷却器  
 DE 凝结水精处理除盐装置  
 DH 除氧器  
 DP 疏水泵  
 E 抽气器  
 EH 省煤器  
 ECD 除氧器余气冷却器  
 FC 给水冷却器  
 FP 给水泵  
 G 发电机

H 回热加热器  
HD 高压除氧器  
HHS 采暖热用户  
HP 热网水泵, 汽轮机高压缸  
HS 热用户  
IHS 工业用汽热用户  
IP 汽轮机中压缸  
LP 汽轮机低压缸  
M 混合器  
MD 补充水除氧器  
NP 热网疏水泵

PH 峰载热网加热器  
PO 减温减压器  
RH 再热器  
RP 回水中继水泵  
SC 外置式蒸汽冷却器  
SG 轴封加热器  
T 汽轮机  
TB 凝汽器内加热管束  
TD 汽动给水泵汽轮机  
TP 前置泵  
WB 热水锅炉

# 目 录

前 言	
主要符号	
绪 论	1
第一章 发电厂的热经济性	6
第一节 发电厂热经济性评价的理论基础	6
第二节 发电厂热经济性的评价方法	7
第三节 凝汽式发电厂的主要热经济指标	20
第二章 发电厂热力循环的参数与型式	23
第一节 蒸汽的初、终参数	23
第二节 蒸汽中间再热	31
第三节 给水回热加热	34
第四节 热电联合生产	42
第五节 燃气—蒸汽联合循环	51
第三章 给水回热加热系统	58
第一节 回热加热器的型式与应用	58
第二节 表面式加热器的结构及其疏水和保护	60
第三节 回热加热器的连接系统	71
第四节 回热系统计算	79
第五节 回热加热器的运行	88
第四章 给水除氧系统	93
第一节 给水除氧的任务和热除氧的原理	93
第二节 除氧器的类型和构造	96
第三节 除氧器的热平衡和连接系统	102
第四节 除氧器滑压运行应采取的措施	107
第五节 除氧器的热力系统及运行	111
第五章 热电厂的供热系统	116
第一节 电、热负荷的特性	116
第二节 热化系数的概念	121
第三节 供热载热质及其热源	123
第四节 蒸汽及水热网供热系统	126
第五节 减温减压器及其热力系统	130
第六章 发电厂的原则性热力系统	134
第一节 概述	134
第二节 发电厂的容量和主要设备的确定	134



第三节	发电厂的辅助热力系统 .....	136
第四节	热力系统主要辅助设备的选择 .....	143
第五节	发电厂原则性热力系统举例 .....	147
第六节	发电厂原则性热力系统计算 .....	158
第七节	发电厂原则性热力系统计算举例 .....	160
第七章	发电厂的全面性热力系统 .....	174
第一节	概述 .....	174
第二节	主蒸汽管道系统 .....	175
第三节	再热式机组的旁路系统 .....	178
第四节	给水管道系统 .....	189
第五节	发电厂的疏放水系统 .....	192
第六节	发电厂全面性热力系统举例 .....	195
第八章	发电厂的汽水管道 .....	202
第一节	管道的技术规范 .....	202
第二节	管道的选择和计算 .....	206
第三节	管道阀门和支吊架 .....	215
第四节	管道热伸长及补偿 .....	226
第九章	发电厂的辅助生产系统 .....	230
第一节	发电厂的燃料供应 .....	230
第二节	发电厂的排烟除尘 .....	247
第三节	发电厂的除灰 .....	253
第四节	发电厂的供水 .....	259
第五节	发电厂的环境保护 .....	267
第十章	发电厂的经济运行 .....	273
第一节	电力系统和发电厂的工况系数 .....	273
第二节	发电厂热力设备的动力特性 .....	276
第三节	发电厂热力设备的经济运行 .....	280
第四节	单元机组的运行 .....	285
附录	热力系统管线、阀门的图形符号 .....	294
参考文献	.....	296

# 绪 论

## 一、电力工业在国民经济中的作用和地位

电力工业是国民经济的先行工业，其发展速度必须高于国民经济的发展速度，才能保证国民经济持续、稳步、健康地发展。电力工业的发展常用电力弹性系数来衡量。电力弹性系数是指电力增长速度与国民经济总产值增长速度的比值。其值在国家工业化初期约为1.2~1.4，以后稍低，但应大于1以上，即用电的增长速度要比国民经济的增长速度快一些，超前一些。否则将制约国民经济的发展，造成缺电的局面。我国1953~1980年电力弹性系数平均为1.73，1981~1985年降到年平均仅0.65，1986~1990年国家增加电力工业的投资，电力弹性系数年平均增至1.16，但1981~1995年15年间全国电力弹性系数年平均仅为0.86，造成全国长期缺电的局面。目前全国缺电约为20%，电力工业的发展滞后于国民经济的发展，电力已成为制约国民经济发展的瓶颈。影响电力工业发展的原因主要是资金问题，用于电力建设的资金不足。按电力先行的要求，一个国家在工业化过程中，用于电力扩大再生产的投资应占国民经济总产值的2%以上，但1980~1992年间我国用于电力扩大再生产的投资平均仅占国民经济总产值的1.2%，同时由于煤炭价格上涨，电费回收困难，基建工程建成价猛增，更加剧了电力建设资金短缺程度。解决电力建设资金短缺的办法是深化电力改革，实行集资办电，多家办电，调动包括中央、地方、部门及境外投资者在内的多方办电的积极性，拓宽资金筹集渠道，发展独立法人的发电公司（或电厂），实行谁投资谁受益的原则，加大投资力度，因此出现1997年电力供需矛盾暂时缓和的局面。

## 二、我国电力工业的发展成就及发展方针

新中国成立以来，电力工业从小到大有很大发展。从1949~1995年，全国装机容量由1850MW增加到214400MW，增长了115倍，发电量由43.1亿kW·h增加到10000亿kW·h，增长了232倍。发电量由世界第25位上升到第2位。每年发电量平均增长速度约为13.8%。旧中国的发电设备完全依靠进口，从1955年我国建立自己的成套发电设备制造工业，生产中参数6MW汽轮发电机组后，70年代已能生产超高参数中间再热125MW、200MW机组，80年代末期已能制造亚临界300MW、600MW成套火电机组和300MW压水堆核电机组，并出口到东南亚各国。近15年来电力工业的发展更快，1986~1990年，平均每年新装机容量10000MW；1991~1995年，平均每年新装机容量12000MW。广东大亚湾与浙江秦山核电站的投产，实现核电“零”的突破。1995年200MW以上机组容量89200MW，占全国装机总容量的42.4%，已建成1000MW以上大电厂57座，形成总容量超过25000MW的东北、华北、华东和华中电网局，广东、广西、贵州和云南已互联电网，供电煤耗、设备事故率、电网事故率等技术经济指标均稳定下降。

我国人口众多，与工业发达国家相比，人均发电装机仅178W，只有发达国家的0.06%~0.08%，发电量和人均净用电量870kW·h/年，列世界第80位，电力技术装备和各项技

术经济指标一般落后 20 年，电力工业仍然是国民经济中的薄弱环节。预计到 2000 年，发电装机规模可达 300GW 左右，全国电力需求量 14000 亿 kW·h，全国 200kV 及以上输电线路达 17.12 万 km，解决 7000 万无电农村人口的用电问题，并消灭无电县。“九五”期间将集中资金开发山西、陕西、河南、云贵等能源基地，计划投产坑口电厂 27000MW 和港口电厂 24000MW 左右，实现超高压线路远距离向负荷中心送电。

2010 年远景目标：全国发电装机容量按与国民经济发展同步应达到 500~550GW 左右，全国总发电量 25000 亿 kW·h 形成以三峡电站为中心的全国联合电网，农村基本实现电气化，电力技术经济指标与国际先进水平靠拢。

我国能源发展采取以电力为中心、以煤炭为基础的方针。电力工业的发展，要大力发展水电，坚持优化火电结构，适当发展核电，因地制宜发展多种新能源发电，同步发展电网，促进全国联网。

### (一) 大力发展水电

水能是最洁净的一次能源，是循环不息的能源，水电站发电效率高，发电成本低，机组启动快，宜于调峰和备用。我国已探明水力资源理论蕴藏量为 680000MW，可供开发的水能资源约 378000MW，相当于年发电量 19200 亿 kW·h，居世界第一。但我国水能开发程度还很低，到 1995 年末实际开发的水电装机容量仅 51200MW，发电量只有 1880 亿 kW·h，分别占可供开发资源的 10.8% 和 10.3%。因水电开发投资较大，工期长，因此水电在全部发电量中的比重逐年下降，1985 年占 22.5%，1990 年降至 20%，1995 年进一步降到 19.1%。发电能源构成趋向火电单一化，与我国资源状态不相符合，因此要大力发展水电，到 2000 年水电装机规模将达到 70000~80000MW，在建设好三峡电站工程的同时，大力开发黄河中上游、长江干支流、红水河、澜沧江和乌江等重点水电资源，适当建设抽水蓄能电站。

### (二) 坚持优化火电结构

我国 1994 年发电量 9050 亿 kW·h 中，火力发电量 7230 亿 kW·h，约占全国总发电量的 80%，水电约占 18.6%，核电占 1.49%，因此我国发电能源构成是以火电为主，火电中又以煤电为主。因为火力发电可采用高效率、大容量机组，单位千瓦投资比核电、水电少，建设周期短（3~5 年），资金回收快，资金利用率高，故要继续发展火电。我国煤炭资源丰富，探明储量达 9660 亿 t，可开采储量 1145 亿 t，1995 年全国煤产量 12.8 亿 t，居世界第一，其中 25% 为火电用煤。全国煤炭储量约 75% 集中在晋、内蒙、陕、甘、宁、新疆等省区，仅山西一省的储量就占全国的 1/3。坚持优化火电结构有充分的燃料来源，发展火电应立足于燃煤，其措施是：

(1) 煤炭基地的开发和交通运输建设要统一规划，加速发展大型坑口、港口和路口电站；

(2) 建设大容量电厂，采用大型机组，电厂规模以 1200~2400MW 为主，机组以 300、600MW 机组为主，严格限制小火电发展；推行“以大代小”工程，电力结构从速度、数量型向质量、效益型转变。

(3) 做好环境保护工作，大型机组全部采用高效静电除尘器，1994 年全国火电已排放

530 多万 t 氧化硫, 2000 年将达 900 万 t, 应逐步增加脱硫电厂的建设, 加快洁净煤燃烧发电技术的开发, “九五”末期投入运行和在建的脱硫设备发电总容量达到 10000~12000MW;

(4) 加强电力建设的前期工作, 扩大在建规模, 选择最佳方案, 发挥火电单位造价低, 建设周期短, 资金回收快的优势, 提高投资效益;

(5) 因地制宜地发展热电联产, 提高燃料的综合利用率, 改善环境卫生;

(6) 提高火电厂的自动化水平, 300MW 以上机组应采用计算机分散控制系统, 实现管理自动化。

### (三) 适当地发展核电

我国东部及沿海 15 个省市经济与工业发达, 其工业总产值约占全国的 73%, 而能源资源仅占全国资源的 10%, 缺电现象严重, 应适当地发展核电, 以补充火电供应不足。

核电在技术上是成熟的, 生产安全, 本身是清洁的能源, 建设一台 1000MW 核电机组, 每年可代替 300 万 t 原煤, 减少大量灰、渣、氧化硫和氮氧化物的排放, 对环境污染比一般火电厂小; 核电成本比火电成本低 1/3~1/2; 核燃料存储运输量少; 电厂占地面积小; 可用率和可靠性与火电不相上下。因此各国都在积极发展核电, 预计 2000 年世界核电容量将占电力总容量的 25% 左右。但核能建设是技术、资金高度密集的产业, 每千瓦的单位投资比煤电高 1~1.5 倍, 建设周期长 (8~10 年), 核燃料的供应、核废料的处理等问题也待解决。目前我国核电装机 2100MW, 从现在起到下世纪初, 还安排秦山二期、广东岭澳、秦山三期重水堆和连云港核电站, 4 个核电项目 8 个堆、6600MW 在建规模, 标志着我国核电建设走向一个新的发展阶段。

### (四) 因地制宜发展多种新能源发电

我国土地辽阔, 边远、游牧、海岛地区农民、牧民、渔民基本用电很难供应。但太阳能、风能、地热能、海洋能和再生新能源等资源丰富, 新能源和可再生能源对环境不产生或很少产生污染, 既是近期急需的补充能源, 又是未来能源结构的基础。目前已探明的地热储量约为 4626 亿 t 标准煤, 现利用的仅约十万分之一, 西藏羊八井地热电站现装机总容量 25MW, 年发电量达 9700 万 kW·h。目前有 12 万余台微型风力发电机组在内蒙、新疆、青海等牧区草原和沿海无电网地区运行, 总容量已达 30MW, 其中有大型风力发电机组 100 多台, 最大单机容量 600kW, 预计 2000 年风力发电容量会达 1000MW。我国目前已建有潮汐发电站总装机容量 5930kW, 年发电量 1021 万 kW·h, 波浪发电试验电站也在建设之中。我国约 960 万平方公里的国土上, 太阳能年总辐射量超过 60 万 J/cm<sup>2</sup>, 开发利用前景广阔, 西藏依靠自己的力量建成 10kW、20kW 和 25kW 光伏电站, 运行可靠, 太阳能电池年销售约 1.1MW, 主要用于边远地区通信系统和照明。

### (五) 同步发展电网, 促进全国联网

发展大电网可以减少电网的备用容量, 提高供电可靠性; 可装设大容量机组, 降低造价, 加快电力建设速度; 可以利用时差减少电网的尖峰负荷; 可以实现水电之间的经济调度和跨流域的水库调度。世界上已实现跨国电网, 我国应同步发展电网。“九五”期间, 三峡枢纽及输变电工程将建设长达 9100km 的 500kV 交直流线路, 2475 万 kW·A 变电容量,

全国联网已提到重要的议事日程。首先实现华中与华东、四川重庆联网，进而创造条件推进三峡与华北、华南联网，粤、桂、黔、滇四省在各省区电力平衡的基础上，加大火电开发力度，改善水电火电比例，加强联合电网建设。要实现东北与华北联网及几个独立省（鲁、闽、琼、新等）的独立电网与周边跨省电网的联网。2010年前将形成以三峡电站为中心的全国联合电网。

### 三、热力发电厂的类型

热力发电厂可按动力供应来源，消耗一次能源，容量大小和参数高低，以及供应能量负荷性质等进行分类。

#### 1. 按动力供应来源分

可分为汽轮机发电厂、内燃机电厂、燃汽轮机发电厂、燃气-蒸汽联合循环发电厂等。

#### 2. 按消耗一次能源分

可分为燃煤发电厂、燃油发电厂、燃气发电厂、核能发电厂、工业余热发电厂、地热发电厂、水力发电厂、风力发电厂、太阳能发电厂、抽水蓄能电厂、海洋潮汐发电站和波浪发电站等。

#### 3. 按机组容量和参数来分

机组容量、电厂容量等级划分是一个发展变化的概念。根据我国情况，现阶段把容量在50MW及以下机组定为小型机组，100~200MW定为中型机组，300MW及以上机组称为大型机组。相应装机容量在200MW以下定为小型发电厂，装机容量在200~800MW定为中型发电厂，装机容量在1000MW及以上的定为大型发电厂。

按进入汽轮机初参数高低可分为中低压（3.43MPa及以下）电厂，高压（8.83MPa）电厂，超高压（12.75MPa）电厂，亚临界压力（16.18~16.6MPa）电厂和超临界压力（23.54MPa及以上参数）电厂。

#### 4. 按供应能量和电厂位置、负荷性质特点分

按供应能量分：生产电能的凝汽式发电厂，供电又供热的热电厂，除供电热外夏季供6~8℃冷水的热电冷三联产的热电厂等。

按电厂位置特点分：坑口（路口、港口）发电厂、负荷中心发电厂。按电厂承担电负荷性质分：基本负荷发电厂、中间负荷发电厂、调峰发电厂。按服务范围分：区域性发电厂、地方发电厂、工业企业自备发电厂、移动式发电厂、未并入电网的孤立发电厂等。

### 四、本课程的作用和任务

本课程是在学过工程热力学、传热学、工程流体力学、泵与风机、电站锅炉、电站汽轮机和生产实习的基础上进行的，是本专业学生必修的一门综合性的专业课。本课程以热力发电厂整体为对象，重点研究汽轮机发电厂的热功转换理论及其设备和热力系统，在安全、经济的前提下，分析热力发电厂的经济效益，热经济性的分析以常规热平衡方法为主。

本课程的任务是综合运用已学过的知识，对发电厂的热机部分和热力系统进行系统深入学习，培养学生树立发电厂安全、经济和效益（社会和环境效益）相对统一的观念，提高其分析和解决发电厂热机部分生产实际问题的能力。

## 复习思考题

1. 什么是电力弹性系数？为什么电力工业的发展速度必须大于国民经济的发展速度？
2. 举例说明改革开放以来我国电力工业取得哪些成就？与先进工业国家相比，还存在哪些差距？
3. 试述我国近期内电力工业的发展方针和技术政策。

# 第一章 发电厂的热经济性

## 第一节 发电厂热经济性评价的理论基础

在发电厂的发电成本中，燃料费用所占份额通常都在 70% 左右，由此可见，发电煤耗率的大小对电厂的经济效益起着决定性的作用。减少电厂能量转换过程中的各种能量损失，提高电厂设备对燃料热能的利用率（通常称其为热经济性），具有特别重大的意义。

评价热力发电厂的热经济性，其目的是为了分析比较热力发电厂各种不同的热力循环型式、不同的循环参数、不同的热力系统连接方式的热经济性，以便在热力设备及热力系统的制造、安装、设计、运行和检修等工作中采取有效措施，减少燃料消耗，推进节能工作。

评价发电厂经济性时，除了热经济性这一主要因素外，还应全面考虑其它有关因素。例如，设计时还要考虑投资效益等因素，采用全面技术经济比较的方法来确定设计方案；在电厂运行时，确定汽水控制参数及设备、系统的运行方式，还要考虑运行的安全可靠性及寿命的损耗等问题。

对发电厂的热经济性进行全面的和正确的评价，必须建立在热力学第一定律、第二定律的基础上，并应用朗肯循环和卡诺循环的研究成果。

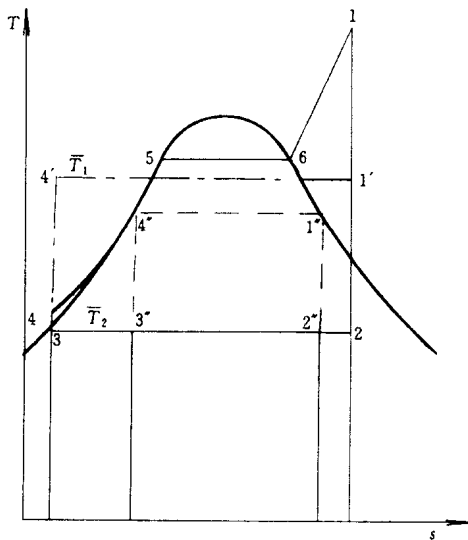


图 1-1 朗肯循环的  $T-s$  图

朗肯循环和卡诺循环是研究汽轮机发电厂热经济性的基本循环。

简单的凝汽式发电厂的理想循环叫做朗肯循环。图 1-1 所示为朗肯循环在  $T-s$  图上的表示。现代汽轮机发电厂所应用的各种复杂的热力循环都是在朗肯循环的基础上逐步改善而形成的，朗肯循环是研究这些复杂循环的基础。

卡诺循环是由两个定温过程及两个绝热过程组成的。在汽轮机发电厂中，要实现卡诺循环是困难的，也是不经济的。根据水工质的热力特性，它只有在湿饱和和蒸汽范围内才有可能实现，如图 1-1 中循环  $1''2''3''4''$  所示。但干饱和蒸汽膨胀做功至较低压力后，排汽湿度过大，难以保证汽轮机

安全工作；对状态  $3''$  下比体积甚大的低压低温湿蒸汽进行绝热压缩，压缩机耗功过大，技术上也有困难。此外，饱和蒸汽卡诺循环的吸热温度不可能高于水的临界点温度 ( $374^{\circ}\text{C}$ )，此温度远低于火电厂常用的蒸汽初温度 ( $535\sim 566^{\circ}\text{C}$ )，所以，假设能实现饱和

蒸汽卡诺循环，其热效率也不高，而且也是不经济的。

研究卡诺循环的实际意义在于：

(1) 说明任何热力循环的热效率都小于 1，其极限值为  $\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$ 。在相同的最高、最低温度范围内，以卡诺循环的热效率为最高，其数学表达式为：

$$\eta_{\text{c}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-1)$$

式中  $T_1$ ——卡诺循环吸热温度，K；

$T_2$ ——卡诺循环放热温度，K。

(2) 卡诺循环热效率的数学表达式提供了一个分析比较各种热力循环热经济性的简便方法。根据式 (1-1)，只要知道循环改变以后吸热温度或放热温度变化的方向和数值，即可方便地判断循环热效率变化的方向和数值。若把朗肯循环 (图 1-1 中的 1234561 所示) 简化为和它的效率相等的 (或称等价的) 卡诺循环 (图 1-1 中的 1'234'1' 所示)，则热效率的表达式为

$$\eta_r = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} \quad (1-2)$$

式中  $\bar{T}_1$ ——等效卡诺循环的吸热过程温度，即朗肯循环吸热过程的平均温度，K；

$\bar{T}_2$ ——等效卡诺循环的放热过程温度，即朗肯循环放热过程的平均温度，K。

当朗肯循环作了某些改变以后，根据  $\bar{T}_1$  或  $\bar{T}_2$  变化的方向和数值，即可迅速判断电厂热经济性变化的方向和数值。这种方法在定性分析应用时较方便，所以在理论研究中得到了广泛的采用。

(3) 卡诺循环热效率的表达式明确地指出了提高发电厂循环热效率的两个基本方向，即提高热力循环吸热过程的平均温度和降低放热过程的平均温度。

在热力发电厂的能量转换过程中，有各种不同的能量损失。其中有的损失是不可避免的，即使是理想设备也不可避免；而大部分损失理论上是可以避免的，只是由于技术上的困难或经济上不合算而存在的。必须指出，包括理想设备不可避免的损失在内，各项损失都是可以设法减少的。

## 第二节 发电厂热经济性的评价方法

发电厂热经济性的评价方法有效率分析法和作功能力法。

### 一、效率分析法

效率分析法是通常采用的传统评价方法，该方法是以效率的高低作为评价动力设备在能量利用方面的完善程度的指标。效率是某一热力循环中装置或设备有效利用的能量占所消耗能量的百分数。效率分析法以热力学第一定律为依据，其实质是能量的数量平衡，所以又可称其效率为第一定律效率，有时就把这种分析方法称为第一定律分析法，它具有直观、计算方便、简捷等优点，目前被世界各国广泛应用于定量计算。



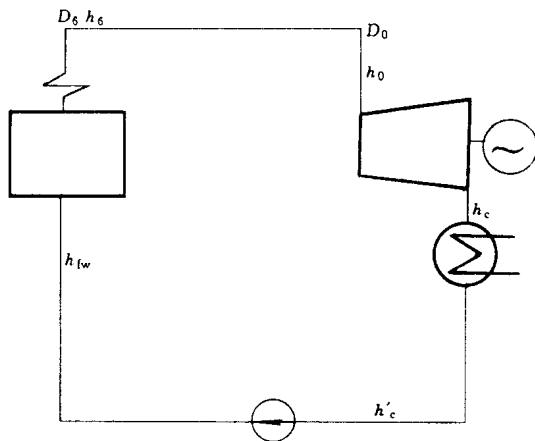


图 1-2 简单凝汽式电厂热力系统

以图 1-2 所示为例，分析实际电厂能量转换过程中的各种能量损失及其效率。

### (一) 锅炉的热损失与锅炉效率

发电厂的燃料在锅炉内燃烧，使燃料的化学能转变为烟气的热能，烟气流过锅炉各部分受热面，又把热量传给水 and 蒸汽。在锅炉内主要的能量损失有：排烟热损失、化学不完全燃烧热损失、机械不完全燃烧热损失、散热损失以及灰渣带走的物理热等。

锅炉效率  $\eta_b$  等于锅炉的热负荷与锅炉消耗燃料热量之比，即

$$\eta_b = \frac{D_b(h_b - h_{fw})}{B \cdot Q_{net,\rho}} \quad (1-3)$$

式中  $D_b$ ——锅炉每小时生产的蒸汽量，kg/h；

$h_b$ ——过热器出口蒸汽焓，kJ/kg；

$h_{fw}$ ——锅炉给水焓，kJ/kg；

$B$ ——锅炉每小时消耗燃料量，kg/h；

$Q_{net,\rho}$ ——燃料的定压低位发热量，kJ/kg。

### (二) 管道热损失与管道效率

锅炉生产的蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机，蒸汽做功后凝结成水，经过升压，再通过给水管道返回锅炉重新吸热。工质通过这些汽水管道时，不免要散失一部分热量，其损失为管道的散热和工质的漏泄等。管道的完善程度用管道效率  $\eta_p$  表示，它等于汽轮机设备的热耗量与锅炉热负荷之比，即

$$\eta_p = \frac{h_0 - h_{fw}}{h_b - h_{fw}} \quad (1-4)$$

式中  $h_0$ ——汽轮机的进汽焓，kJ/kg。

### (三) 汽轮机设备中的冷源损失与汽轮机内效率

蒸汽在汽轮机内膨胀做功，而后进入凝汽器放热并凝结成水。排汽焓与凝结水焓之差 ( $h_c - h'_c$ ) 即为汽轮机设备中的冷源损失。此冷源损失包括两部分，第一部分是理想汽轮机排汽在凝汽器内的放热量，即理想汽轮机也不可避免的冷源损失，所以可称其为固有冷源损失。这部分热损失的大小决定于热力循环的型式和参数。通常用循环效率  $\eta_t$  来说明热力循环的型式与循环参数的先进性，它等于循环理想功与循环耗热量之比，即

$$\eta_t = \frac{h_0 - h_{ca}}{h_0 - h_{fw}} \quad (1-5)$$

式中  $h_{ca}$ ——理想汽轮机排汽焓（如图 1-3 所示），kJ/kg。