

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热力发电厂

肖增弘 周振起 主编

RELI FADIAN CHANG



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热 力 发 电 厂

主 编 肖增弘 周振起
副主编 夏永军 张瑞青 赵星海
参 编 王 雷 孟召军 王 强
主 审 张树芳



机械工业出版社

本书以 300MW、600MW、1000MW 火电机组为典型机组，重点介绍了发电厂主要辅助设备的结构、工作原理，发电厂典型机组的原则性热力系统及局部全面性热力系统的组成、连接方式和特点；定性分析了发电厂的经济性指标；简单介绍了发电厂汽水管道、阀门及布置，发电厂的辅助设备 & 系统以及新能源发电技术。

本书可作为高职高专院校电厂热动力装置专业、发电厂集控运行专业教材，也可以作为从事火电厂运行、检修及设计的技术人员学习与参考的书籍。

为方便教学，本书配有免费电子课件及模拟试卷等，凡选用本书作为教材的学校，均可来电索取。咨询电话：01088379758；电子邮箱：wang-zongf@163.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

热力发电厂 / 肖增弘, 周振起主编. — 北京: 机械工业出版社, 2012. 8
高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材
ISBN 978-7-111-38573-8

I. ①热… II. ①肖…②周… III. ①热电厂 - 高等职业教育 - 教材
IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 111729 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 于宁 王宗锋 责任编辑: 王宗锋 苑文环
版式设计: 霍永明 责任校对: 王欣 责任印制: 乔宇
北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)
2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 17.25 印张 · 424 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-38573-8
定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书力求理论与实际紧密结合，以 300MW、600MW、1000MW 火电机组为典型机组，重点介绍了发电厂主要辅助设备的结构、工作原理，发电厂典型机组的原则性热力系统及局部全面性热力系统的组成、连接方式和特点；定性分析了火电厂的经济性指标；简单介绍了发电厂汽水管道、阀门及布置，发电厂的辅助设备及系统以及新能源发电技术。教材内容尽可能精练，文字通俗易懂，设备和系统的插图选择了一些电厂实际照片和实际运行操作画面，使相关知识更加贴近现场实际，体现了理论为实际应用服务的理念。

本书由沈阳工程学院的肖增弘、东北电力大学的周振起担任主编，沈阳工程学院的夏永军和张瑞青、东北电力大学的赵星海担任副主编，参加编写的还有沈阳工程学院的王雷、孟召军和王强，全书由肖增弘统稿。第 1 章、第 7 章、第 8 章由肖增弘编写；第 3 章、第 6 章由夏永军编写；第 4 章、第 10 章由张瑞青编写；第 2 章由周振起编写；第 5 章、第 9 章由赵星海编写；王雷、孟召军、王强参与了部分章节的编写。全书由华北电力大学的张树芳主审。

本书在编写过程中得到了国电宁夏石嘴山发电有限责任公司李泓、华能国际电力股份有限公司福州电厂蔡志荣、华电铁岭发电有限公司王中利、中电投集团宁夏能源铝业临河发电有限公司黄宝诚及沈阳煤业集团红阳热电有限公司蒋凤辰的大力支持和帮助，在此谨致谢意。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏及不妥之处，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

| | | |
|-----------------------|---------------------|-----|
| 前言 | 5.4 管道的膨胀、补偿、支吊和保温 | 99 |
| 第1章 绪论 | 思考题 | 110 |
| 1.1 我国电力工业的现状与发展趋势 | 第6章 发电厂的原则性热力系统 | 112 |
| 1.2 发电厂的类型 | 6.1 热力系统及主要设备选择原则 | 112 |
| 1.3 火力发电厂的主要生产过程 | 6.2 发电厂原则性热力系统举例 | 116 |
| 思考题 | 6.3 发电厂原则性热力系统的计算 | 124 |
| 第2章 热力发电厂热经济性分析与评价 | 6.4 发电厂原则性热力系统的计算举例 | 127 |
| 2.1 热力发电厂热经济性评价方法 | 思考题 | 147 |
| 2.2 凝汽式发电厂的主要热经济指标及评价 | 第7章 发电厂的全面性热力系统 | 148 |
| 2.3 提高热力发电厂热经济性的主要方法 | 7.1 主蒸汽系统 | 148 |
| 思考题 | 7.2 再热机组的旁路系统 | 156 |
| 第3章 发电厂的给水回热加热系统 | 7.3 主凝结水系统 | 161 |
| 3.1 给水回热加热器结构及连接类型 | 7.4 主给水系统 | 169 |
| 3.2 典型机组给水回热加热系统 | 7.5 给水回热抽汽系统 | 177 |
| 3.3 给水回热加热系统的保护 | 7.6 给水回热加热器的疏水与放气系统 | 179 |
| 3.4 给水回热加热器的运行 | 7.7 汽轮机的轴封系统 | 183 |
| 思考题 | 7.8 汽轮机本体疏水系统 | 188 |
| 第4章 除氧器及其系统 | 7.9 辅助蒸汽系统 | 190 |
| 4.1 给水除氧的任务及除氧方式 | 7.10 小汽轮机的热力系统 | 194 |
| 4.2 除氧器的类型与构造 | 7.11 凝汽器抽真空系统 | 197 |
| 4.3 除氧器的连接方式 | 7.12 循环冷却水系统 | 199 |
| 4.4 除氧器的运行 | 7.13 发电机冷却系统 | 204 |
| 思考题 | 7.14 热电厂的供热系统 | 208 |
| 第5章 发电厂的汽水管道及附件 | 思考题 | 212 |
| 5.1 发电厂汽水管道的规范与材料 | 第8章 火电厂其他主要辅助设备及系统 | 213 |
| 5.2 发电厂汽水管道的计算与选择 | 8.1 火电厂燃料运输系统和设备 | 213 |
| 5.3 发电厂的阀门 | 8.2 火电厂的供水系统 | 224 |
| | 8.3 火电厂的除尘设备 | 227 |

| | | | |
|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 8.4 火电厂烟气脱硫与烟气脱硝 系统 | 230 | 思考题 | 250 |
| 8.5 火电厂的除灰渣系统 | 233 | 第 10 章 新能源及绿色能源 | 251 |
| 思考题 | 239 | 10.1 核电厂及其热力系统 | 251 |
| 第 9 章 发电厂主厂房布置 | 240 | 10.2 风力发电 | 258 |
| 9.1 主厂房布置概述 | 240 | 10.3 地热发电 | 262 |
| 9.2 主厂房布置形式 | 241 | 10.4 太阳能热力发电 | 265 |
| 9.3 主厂房内设备的布置 | 246 | 思考题 | 268 |
| | | 参考文献 | 269 |

第 1 章 绪 论

1.1 我国电力工业的现状与发展趋势

1.1.1 我国电力工业的现状

新中国成立初期,我国电力工业的基础极其薄弱,发电装机容量和发电量只有 185 万 kW 和 43 亿 kW·h,分别居世界第 21 位和第 25 位。到 1978 年,发电装机容量和发电量达到 5712 万 kW 和 2566 亿 kW·h,分别跃居世界第 8 位和第 7 位。1991 年,我国的发电装机容量为 15147.31 万 kW,年发电量为 6774.94 亿 kW·h,均居世界第 4 位。到 1996 年底,这两项分别达到 23654 万 kW 和 10794 亿 kW·h,均跃居世界第二位。2002 年我国电力体制进行了重大改革,将原国家电力公司分拆组建为两大电网公司、五大发电集团公司和四大辅业公司。这次电力体制改革,基本打破了垄断,实现了厂网分开,在发电环节引入了竞争机制,极大地解放了电力生产力,促进了电力工业的快速发展。2002 年我国发电装机容量为 35657 万 kW,2007 年我国发电装机容量达到 71329 万 kW,五年新增发电装机容量相当于过去 53 年的总和。

目前我国电力工业无论是发电装机容量还是发电量均居全球第二位,仅次于美国,成为世界上的电力生产和消费大国。随着华能玉环电厂、华电邹县电厂、神华国华绥中等电厂百万千瓦超超临界压力机组的相继投运,标志着我国已经成功掌握了世界先进的火力发电技术,电力工业已经开始进入“超超临界”时代,600MW 及以上清洁高效机组已成为新建项目的主力机型,电网规模迅速扩大,电压等级不断提升。全国大部分地区已形成 800kV 主网架,西北地区 750kV 输变电工程投产,1000kV 特高压交流试验示范工程和 800kV 直流试验示范工程正在建设之中。

目前,火电是我国电力生产行业的主体,截至 2007 年,火电装机容量达到 55442 万 kW,约占发电总装机容量的 77.73%,同比增长 14.59%,高于同期 14.36% 的全国总发电装机容量增长率。全口径发电量则达到 26980 亿 kW·h,占全国发电量的 82.86%,同比增长 13.83%,略低于同期 14.44% 的全国总发电量增长率。

水电是我国电力生产行业的重要组成部分,2007 年我国水电装机容量达到 14526 万 kW,约占发电总装机容量的 20.36%,同比增长 11.49%。水电发电量 4867 亿 kW·h,约占全国发电量的 14.95%,同比增长 17.61%。

我国核电工业处于自主技术成熟化、批量建设的准备阶段,核电站数量较少,核电发电比重较低。2007 年我国核电发电量 626 亿 kW·h,约占全国发电量的 1.92%,同比增长 14.05%。

我国风能发电的比重还很低,2007 年风电的装机总容量约占全国发电总装机容量的 0.57%。但近几年发展速度很快,从 2007 年起,风力发电取得突破性的发展,中国国电集团公司、中国大唐集团公司风电装机容量相继超过百万千瓦,内蒙古自治区成为全国首个风

电装机容量突破百万千瓦的省份。同年 11 月，我国第一个海上风电在渤海油田顺利投产。

1.1.2 我国电力工业的发展趋势

我国电力工业的主要方向为发展大型电站和大容量、高参数及环保节能的机组，采用超临界、超超临界压力机组及循环流化床技术，整体煤气化发电技术，增大热电联产（包括热、电、冷、气多联产）、燃气—蒸汽联合循环及分布式能源系统在电源中的比例等，以提高火力发电厂效率、降低发电成本、减少环境污染。

1. 建设超临界、超超临界压力机组

火电机组的建设主要是以 600MW、1000MW 超临界和超超临界压力机组为主，它们具有效率高、煤耗低、自动化程度高、运行人员少的特点，而且还有建设周期短、单位容量占地面积小等适合我国国情的优势。改革开放 30 年的成就已经说明了这一点，今后还会坚持走下去。在北方缺水地区发展大型空冷机组，进一步完善 600MW 等级空冷机组，着重在直接空冷技术上。

2. 坚持烟气脱硫（Flue Gas Desulfurization，FGD）、脱硝（Selective Catalytic Reduction，SCR）及高效除尘成套技术的推广

目前国家对环保的要求越来越严，很多地方已出台了电站必须加装脱硫装置和采用低 NO_x 燃烧器，以减少 SO₂ 和 NO_x 排放的地方性法规。目前世界上技术比较成熟的有常压循环流化床锅炉（Circulating Fluidized Bed Combustor，CFBC）、增压流化床锅炉联合循环（Pressurized Fluidized Bed Combustor-Combined Cycles，PFBC-CC）以及整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycles，IGCC）三种。联合循环发电机组与常规机组加脱硫脱硝装置相比，效率更高，至少可提高 3% ~ 6%。

3. 发展热电联产

在有条件的地方，都要积极发展热电联产，热、电、冷、气多联产。到 2020 年，全国热电联产发电总装机容量将达到 2 亿 kW，其中城市集中供热和工业生产用热的热电联产装机容量都约为 1 亿 kW。预计到 2020 年，热电联产将占全国发电总装机容量的 22%，在火电机组中的比例为 37% 左右。热电联产机组应当实行大、中、小并举，在大城市热负荷量大且集中的地方，支持 200MW、300MW 和 600MW 的大型供热机组，在城市供热方面发挥主力军作用；对于热负荷小和以生物质能、太阳能、垃圾等为燃料的热电联产，就可以是几万千瓦到几百千瓦的小机组，这些机组虽小，但由于是热电联产，其效率往往比 300 MW、600MW 的凝汽式机组的效率还高。

4. 开展以大型燃气轮机为核心的联合循环发电技术

联合循环机组具有提高能源利用效率，保护环境和改善电网调峰性能等多重优势。天然气产量的增加及其在使用中可减轻环保压力，使燃气轮机发展非常迅速，燃气轮机入口前的初温有了较大提高，当初温为 1260 ~ 1300℃ 时，简单循环效率达 36% ~ 40%，联合循环效率达 55% ~ 58%；当初温提高到 1430℃ 时，简单循环效率大于或等于 40%，联合循环效率可大于或等于 60%。有资料表明，目前全世界新增火电容量中，燃气轮机及其联合循环机组占到了 50% 以上，美国在最近 10 年新增发电装机容量为 113GW，其中燃气轮机电站就占 44%；德国占到了 66.7% 左右。我国燃气轮机发电的总装机容量仅占全国发电总装机容量的 2% ~ 8%，且单机容量偏小。今后需发展单机容量 300MW 级的燃气轮机发电机组，

提高其在发电总装机容量中的比重，这对于改善电网运行状况，为电网提供更加灵活的备用电源，增大调峰的灵活性，减少碳和硫的排放都具有重大的意义。

5. 推广分布式能源系统的建设

中国的电力工业正处在快速发展阶段，具备实现跨越式发展的有利条件，在大力发展集中供电的同时，如果能抓住机遇，加快发展分布式发电，可以建立一种分布式能源发电与集中供电互相补充、互相支持的新型电力工业体系，不仅可以提高电力系统的效率，而且可以提供更普遍、更可靠、更优质的电力服务，更好地促进经济和社会的可持续发展。

6. 积极稳妥地加快核能发电的建设

近年来，国家实施了多项重大举措，使我国核电事业步入了快速发展的轨道。营造了一个有利于核电发展的法制环境；颁布了核电中长期发展规划，确定了我国核电发展的目标；明确了我国核电发展的技术路线，决定引进目前世界上最先进的第三代核电 AP1000 技术，走引进、消化、吸收和再创新的发展道路；在国家中长期科技发展规划中列入了大型先进压水堆和高温气冷堆核电站重大专项；对核电管理体制进行了改革，将核电业务纳入到国家能源局统一管理；陆续批准并开工建设一批新的核电项目。

1.2 发电厂的类型

1.2.1 发电厂的分类

按所使用的能源划分，发电厂有下述几种基本类型。

1. 火力发电厂

火力发电厂是利用煤、石油、天然气等燃料燃烧所得到的热能生产电能的发电厂。按燃料类型又可分为燃煤发电厂、燃油发电厂、燃气发电厂以及其他燃料的发电厂。

2. 水力发电厂

水力发电厂是将高处的河水（或湖水、江水）通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电的电厂。

3. 核能发电厂

核能发电厂是利用核反应堆中核燃料（例如铀）原子核发生裂变反应所放出的热能产生蒸汽（代替了火力发电厂中的锅炉），驱动汽轮机再带动发电机旋转发电的电厂。

4. 风力发电厂（场）

风力发电厂（场）是通过风轮机把风能的运动动能提取、转换成转轴输出的机械能，驱动发电机发电的电厂（场）。

5. 太阳能发电厂

太阳能发电主要有太阳能光伏发电和太阳能热发电两种基本方式。太阳能光伏发电是利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能的直接发电方式。太阳能热发电是将吸收的太阳辐射热能转换成电能的发电方式。

6. 地热能发电厂

地热能发电厂有三种情况：一是直接利用地热井中的干蒸汽推动汽轮发电机组发电的电厂；二是从地热井提取参数较高的湿蒸汽或热水，通过扩容降压产生蒸汽来推动汽轮发电机

组发电的电厂；三是当从地热井提取的湿蒸汽（或热水）参数较低或含有较多不凝结气体杂质时，通过热交换器使低沸点液体产生蒸汽来推动汽轮发电机组发电。

7. 抽水蓄能发电厂

抽水蓄能发电厂是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将水的势能转换为电能的发电厂。

另外，还有潮汐能发电厂、海洋能发电厂及磁流体发电厂等。

1.2.2 热力发电厂的类型

热力发电厂是将热能转化为机械能，再将机械能转换成电能的发电厂。

1. 按使用能源划分

热力发电厂包括上述类型中的火力发电厂、核能发电厂、太阳能热发电厂及地热发电厂。

2. 按原动机类型分

热力发电厂分为汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂及燃气—蒸汽联合循环发电厂。

3. 按发电厂功能分

热力发电厂分为供电的凝汽式发电厂、供电供热的热电厂、供电供热供冷（制冷）的发电厂、供电供热供煤气的发电厂及多功能发电厂。

4. 按蒸汽压力和温度分

中低压发电厂：蒸汽压力一般为 3.92MPa、温度为 450℃ 的发电厂，单机功率小于 25MW。

高压发电厂：蒸汽压力一般为 9.9MPa、温度为 540℃ 的发电厂，单机功率小于 100MW。

超高压发电厂：蒸汽压力一般为 13.83MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率小于 200MW。

亚临界压力发电厂：蒸汽压力一般为 16.77MPa 或 18.24MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率为 300~600MW。

超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 22.11MPa、温度为 550℃/550℃ 的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

超超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 25MPa、蒸汽温度高于 580℃ 的发电厂，机组功率为 600MW 及以上。

1.3 火力发电厂的主要生产过程

1.3.1 朗肯循环

火力发电厂采用的基本循环是蒸汽基本动力循环——朗肯循环。图 1-1 所示为朗肯循环热力系统，循环系统由锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵组成。水在锅炉中吸热成为过热蒸汽；过热蒸汽在汽轮机中推动汽轮机转子旋转做功，转子带动发电机发电；从汽轮机中排出

的乏汽在凝汽器中放热变成水；水经过给水泵升压送回锅炉。

图 1-2 所示为朗肯循环过程在 $T-s$ 图上的表示。从图 1-2 中可以看出，工质循环经历了四个热力过程。4—5—6—1 是工质在锅炉中被定压加热、汽化和过热的过程，1—2 是过热蒸汽在汽轮机中定熵膨胀做功的过程，2—3 是排汽在凝汽器中定压凝结放热的过程，3—4 是凝结水在水泵中定熵压缩的过程。

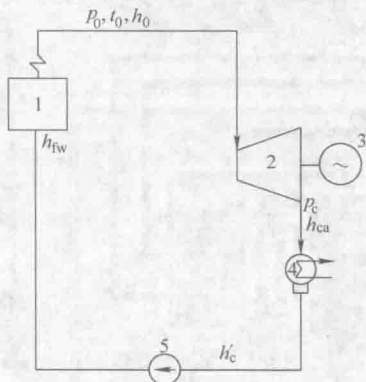


图 1-1 朗肯循环热力系统

1—锅炉 2—汽轮机 3—发电机
4—凝汽器 5—水泵

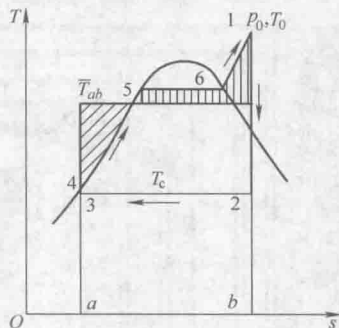


图 1-2 朗肯循环 $T-s$ 图

1.3.2 火力发电厂的生产过程

在朗肯循环的基础上，现代火力发电厂采用了多级给水回热加热、蒸汽中间再热循环，如图 1-3 所示。

煤由上煤机送入煤仓后进入磨煤机，在其中研制成煤粉，同时送入热空气进行干燥并将煤粉送入锅炉燃烧。由送风机送来的空气，在进入炉膛之前，先在空气预热器中接受排烟的预热。炉膛内的燃烧产物——高温烟气，在引风机的作用下，沿着锅炉烟道依次流过炉膛、过热器、再热器、省煤器和空气预热器，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气进入除尘器进行净化，净化除尘后的烟气被引风机抽出，最后经烟囱排入大气。

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下来的飞灰，通常都用水冲入冲渣沟和冲灰沟，并随冲灰水流往灰渣泵房，然后用灰渣泵、灰渣管道等设备将其排送到储灰场。

燃料在锅炉中燃烧放出的热量将水加热并蒸发成饱和蒸汽，经进一步加热后成为具有一定压力和温度的过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管道进入汽轮机，推动汽轮机的转子转动，从而获得机械能。在汽轮机中做完功的乏汽排入凝汽器，在其中被由循环水泵提供的冷却水冷却而凝结成水，凝结水经凝结水泵升压，经低压加热器加热，然后进入除氧器除氧，再由给水泵升压，经高压加热器进一步加热后送入锅炉。送入锅炉的给水又继续重复上述循环过程。

在凝汽器中汽轮机的排气被冷却水冷却成凝结水，冷却水由循环水泵升压，通过冷却水管道进入凝汽器。从凝汽器中出来的具有一定温升的冷却水进入冷却塔放热，然后再进入凝

汽器吸热，这就形成了汽轮机的冷却水系统。

发电机由汽轮机直接拖动，所发出的交流电，一小部分由厂用配电设备予以分配，作为厂房照明和各种辅助设备的厂用电源，其余大部分电能经升压变压器升压后，再经输电线路送入电网，由电网调度中心统一分配给用户。

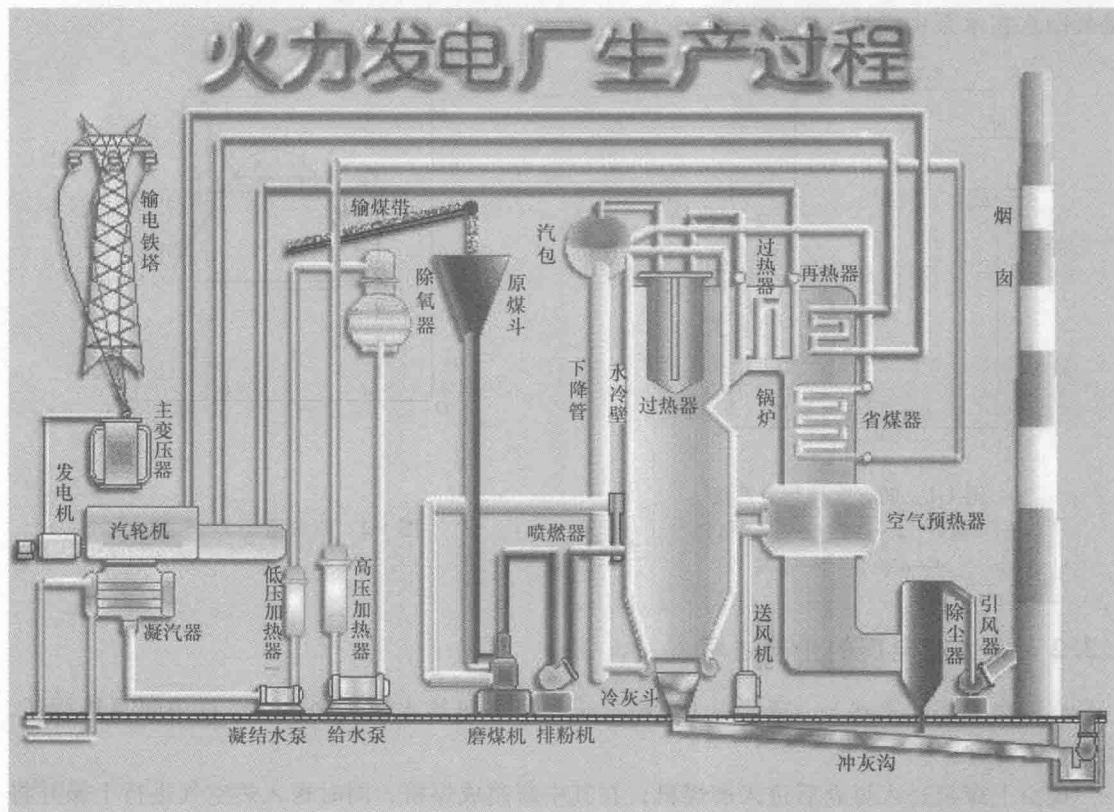


图 1-3 火力发电厂的生产过程

思考题

1. 举例说明我国电力工业发展的现状及发展趋势。
2. 叙述火力发电厂的主要生产过程。

第2章 火力发电厂热经济性分析与评价

2.1 火力发电厂热经济性评价方法

火力发电厂的电能生产过程是一个能量转换的过程,即由燃料的化学能转换成蒸汽的热能,蒸汽在汽轮机中膨胀做功,将蒸汽的热能转换为机械能,通过发电机最终将机械能转变为电能。在能量转换过程的不同阶段会因各种原因而产生能量损失,使得能量不能被全部利用。火力发电厂的热经济性主要用来说明火电厂燃料的利用程度,以及火力发电过程中各部分能量利用或损失的情况。热经济性是以燃料化学能转换为电能和热能的过程中能量利用程度(正平衡方法)或损失的大小(反平衡的方法)来衡量的。通过研究发电厂能量转换及利用过程中的各项损失产生的部位、大小及原因,以便找出减少这些损失的方法和措施,进而提高发电厂的热经济性。

评价能量利用的程度有两种观点:一种是能量数量的利用,另一种是能量质量的利用,为此导致了不同的评价方法。从热力学观点来分析,有两种基本分析方法,第一种方法是以热力学第一定律为基础的热量法(效率法、热平衡法),第二种方法以热力学第二定律为基础的熵分析法或以热力学第一定律和第二定律相结合的焓分析法(焓分析法和熵分析法统称为做功能力分析)。

热量法是从能量转换的数量来评价其效果的,即以热效率或热损失的大小对发电厂或热力设备的热经济性进行评价,一般用于发电厂热经济性的定量分析。熵分析法或焓分析法是以燃料化学能的做功能力被利用的程度来评价发电厂的热经济性,由于它的定量计算复杂,使用起来不方便、不直观,一般用于发电厂热经济性定性分析,以便从本质上指导技术改进方向。根据高职高专学生的基础和特点,本章只介绍热量法。

2.1.1 评价火力发电厂热经济性的主要方法——热量法

热量法是以燃料产生的热量被有效利用的程度对发电厂热经济性进行评价,其实质是用热量的利用程度(如各种效率)或损失大小(如热量损失或热量损失率)在热力设备或火力发电过程中的分布情况来表示发电厂的热经济性。

能量转换及传递过程中的热平衡关系为

输入的总热量 = 有效利用的热量 + 损失的热量

热效率就是某一热力发电过程或设备有效利用的能量占所消耗能量的百分数,其通用表达式可以定义为

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{有效利用的热量}}{\text{供给的热量}} \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{\text{损失的热量}}{\text{供给的热量}}\right) \times 100\% \quad (2-1)\end{aligned}$$

用数学符号表示为

$$\eta = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{Q_1 - \sum_i Q_i}{Q_1} = 1 - \sum_i \zeta_i \quad (2-2)$$

式中, Q_1 是外部输入的热量; W_1 是热力循环中的理想循环做功量 (以热量计); $\sum_i Q_i$ 是循环中各项能量损失之和; $\sum_i \zeta_i$ 是循环中各项能量损失率之和。

热效率的大小定量地表征了设备或热力发电过程的能量转换效果, 反映了设备的技术完善程度。在发电厂整个能量转换过程的不同阶段, 采用各种效率来反映不同阶段能量的有效利用程度 (也可以用能量损失率来反映各阶段能量损失的大小)。

2.1.2 热力发电厂能量转换过程中能量的损失及利用

热力发电厂按其对外供应的产品不同, 可分为凝汽式发电厂和热电厂两种。凝汽式发电厂只对外供应电能, 在汽轮机中做完功的蒸汽, 在很低压力下 (高真空下) 排入凝汽器凝结成水; 热电厂既对外供应电能又对外供应热能, 且对外供应的热能是利用在汽轮机中做了一部分功的较高压力的排汽或可调节抽汽实现的。

下面将利用热量法对凝汽式发电厂电能生产过程中各热力设备的能量损失和效率进行分析, 以进一步说明评价发电厂热经济性方法的具体应用。

1. 电能生产过程与循环热效率

凝汽式发电厂电能生产过程由以下几部分组成: 燃料在锅炉中燃烧将燃料的化学能转化为热能, 烟气再将热量传递给循环工质, 工质吸热成为高温高压的过热蒸汽, 蒸汽通过主蒸汽管道进入汽轮机内膨胀做功, 进行热功转换, 再通过机械传动与发电机将机械能转换为电能, 其简单的热力生产过程流程如图 2-1a 所示。

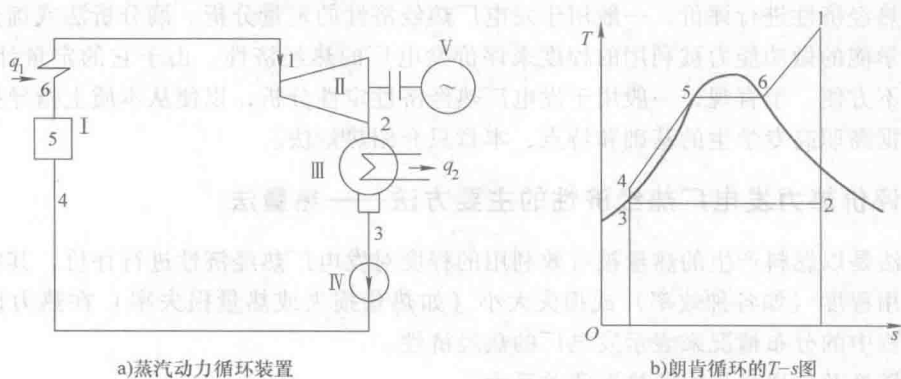


图 2-1 蒸汽动力循环装置及朗肯循环的 $T-s$ 图

I—锅炉 II—汽轮机 III—凝汽器 IV—给水泵 V—发电机

热力发电厂的热力循环是以朗肯循环为基础的, 通过热功转换获取电能。朗肯循环是一种最基本、最简单的动力循环, 图 2-1b 为朗肯循环过程的 $T-s$ 图, 其工作过程为: 4—5—6—1 是给水在锅炉中被定压加热、汽化和过热的过程; 1—2 是过热蒸汽在汽轮机中等熵膨胀做功的过程; 2—3 是汽轮机排汽在凝汽器中定压凝结的过程; 3—4 是凝结水在水泵中等熵压缩的过程, 压力升高后的水再次进入锅炉完成循环。循环中热功转换的完善程度用热效率表示, 它等于有效利用的热量 (理想循环做功量) 与供给热量 (循环吸热量) 之比, 即

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} \quad (2-3)$$

式中, w_i 是理想循环做功量 (kJ/kg); q_1 是理想循环吸热量 (kJ/kg); q_2 是理想冷源损失 (kJ/kg); \bar{T}_2 是平均放热温度 (K); \bar{T}_1 是平均吸热温度 (K)。

在具体计算时, 做功量、吸热量以及放热量均可用工质焓的变化表示。此时热效率 η_i 可表示为

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_1} = \frac{(h_0 - h_{ca}) - (h_{pu} - h'_c)}{h_0 - h_{pu}} \quad (2-4)$$

在蒸汽初压不高时, 给水泵的耗功可以忽略不计, 即 ($h_{pu} \approx h'_c$), 于是

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_1} = \frac{(h_0 - h_{ca})}{h_0 - h_{pu}} \quad (2-4a)$$

式中, h_0 是新蒸汽进入汽轮机的初焓值 (kJ/kg); h_{ca} 是新蒸汽在汽轮机中等熵膨胀后的终焓值 (kJ/kg); h'_c 是凝结水焓值 (kJ/kg); h_{pu} 是给水泵出口给水焓值 (kJ/kg); ($h_0 - h_{ca}$) 表示 1kg 蒸汽在汽轮机中等熵膨胀所做的功, ($h_{pu} - h'_c$) 表示 1kg 凝结水通过给水泵时所消耗的功。

2. 能量转换过程中能量的损失及利用

在发电厂实际生产过程中, 由于种种不可逆因素的存在, 使得能量传递和转换过程中存在各种损失, 通常用热力发电过程或设备的热效率表示损失的大小, 这种评价发电厂热经济性的方法称为热量法。

在发电厂整个能量转换过程的不同阶段, 常采用各种效率来反映不同阶段能量的有效利用程度, 即用能量损失率来反映各阶段能量损失的大小。

(1) 锅炉设备的热效率与热损失率 锅炉设备中的热损失主要包括: 排烟热损失、散热损失、化学未完全燃烧热损失、机械未完全燃烧热损失、排污热损失及灰渣热物理损失等, 其中排烟热损失最大, 占锅炉总热损失的 40% ~ 50%。

锅炉热效率 η_b 为锅炉设备输出的被有效利用的热量 (锅炉热负荷) 与输入热量 (燃料在锅炉中完全燃烧时的放热量) 之比, 其表达式为

$$\eta_b = \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Bq_{net}} = \frac{D_b(h_b - h_{fw})}{Bq_{ent}} \quad (2-5)$$

锅炉热损失率 ζ_b 为

$$\zeta_b = \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Bq_{net} - Q_b}{Bq_{net}} = 1 - \frac{Q_b}{Bq_{net}} = 1 - \eta_b \quad (2-6)$$

式中, Q_b 是锅炉热负荷 (kJ/h); Q_{cp} 是全厂热耗量 (kJ/h); ΔQ_b 是锅炉中损失的热量 (kJ/h); B 是锅炉煤耗量 (kg/h); q_{net} 是燃料的低位发热量 (kJ/kg); D_b 是锅炉的蒸发量 (kg/h); h_b 是锅炉出口过热蒸汽的比焓值 (kJ/kg); h_{fw} 是锅炉给水比焓 (kJ/kg)。

锅炉热效率反映了锅炉设备结构的完善程度和运行经济性, 其影响因素很多, 如锅炉的参数、容量、结构特性、燃烧方式及燃料的种类等。通常情况下需要通过试验来确定各项损失的大小, 进而计算出锅炉的热效率。目前大型锅炉热效率一般为 90% ~ 94%。

(2) 管道热效率与热损失率 锅炉生产的蒸汽流过主蒸汽管道进入汽轮机做功, 在管道内流动时会有节流损失和散热损失, 节流损失通常放在汽轮机相对内效率中考虑, 而散热损

失则放在管道热效率中考虑。管道热效率反映了管道保温结构的完善程度,用汽轮机的热耗量 Q_0 与锅炉设备热负荷 Q_b 之比表示,若不计工质的泄露损失 ($D_0 = D_b$),其表达式为

$$\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b} = \frac{D_0(h_0 - h_{fw})}{D_b(h_b - h_{fw})} = 1 - \frac{\Delta Q_p}{Q_b} \quad (2-7)$$

式中, Q_0 是汽轮机组的热耗量 (kJ/h); D_0 是汽轮机组的汽耗量 (kg/h)。

管道的热损失率 ζ_p 为

$$\zeta_p = \frac{\Delta Q_p}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q_p}{Q_b} \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \left(1 - \frac{Q_0}{Q_b}\right) = \eta_b(1 - \eta_p) \quad (2-8)$$

式中, ΔQ_p 是管道热损失 (kJ/h)。

管道热效率反映了管道设施保温的完善程度和工质损失热量的大小,管道热效率一般为 98% ~ 99%。

(3) 汽轮机的绝对内效率与冷源损失率 蒸汽在汽轮机中膨胀做功的过程是一个不可逆过程,因此除了理想情况下(汽轮机无内部损失)汽轮机排汽在凝汽器中放热的冷源损失外,还存在着进汽节流损失、排汽阻力损失及内部(包括叶形、漏汽、摩擦及湿汽等)损失等。这些损失造成了做功量的减少,使得汽轮机的实际排汽焓 h_c 大于理想排汽焓 h_{ca} ,从而增加了一部分冷源损失 ($h_c - h_{ca}$)。这个过程损失的大小用汽轮机绝对内效率(又称为实际循环热效率) η_i 表示,即汽轮机实际内功率 W_i 与汽轮机热耗量之比(即单位时间所做的实际内功与耗用的热量之比)。忽略水泵耗功时,汽轮机绝对内效率 η_i 的表达式为

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} = 1 - \frac{\Delta Q_c}{Q_0} = \frac{W_i}{W_a} \frac{W_a}{Q_0} = \eta_{ri} \eta_t \quad (2-9)$$

若不计系统中的工质损失,进入汽轮机的蒸汽流量 D_0 与给水流量 D_{fw} 相等,则式(2-9)用焓降的形式表示为

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} = \frac{D_0(h_0 - h_c)}{D_0(h_0 - h_{fw})} = \frac{h_0 - h_c}{h_0 - h_{ca}} \frac{h_0 - h_{ca}}{h_0 - h_{fw}} = \eta_{ri} \eta_t \quad (2-10)$$

其中, $\eta_{ri} = \frac{W_i}{W_a} = \frac{h_0 - h_c}{h_0 - h_{ca}}$ (2-11)

$$\eta_t = \frac{W_a}{Q_0} = \frac{h_0 - h_{ca}}{h_0 - h_{fw}} \quad (2-12)$$

式中, η_{ri} 称为汽轮机的相对内效率,是汽轮机中蒸汽的实际焓降与理想焓降之比,它反映了汽轮机内部结构的完善程度,现代大型汽轮机的相对内效率约为 87% ~ 90%; Q_0 是汽轮机汽耗为 D_0 时的热耗量 (kJ/h); W_i 是汽轮机汽耗为 D_0 时的实际内功率 (kJ/h); W_a 是汽轮机汽耗为 D_0 时的理想内功率 (kJ/h); ΔQ_c 是汽轮机的冷源损失 (kJ/h); η_t 是循环的理想热效率。

汽轮机的绝对内效率 η_i (一般简称为汽轮机的内效率) 不仅表示凝汽式汽轮机理想循环的热量利用率 (η_t 或理想冷源损失),还表示了汽轮机通流部分的热功转换效率 (η_{ri} 或附加冷源损失)。现代大型汽轮机的内效率可达 45% ~ 47%。

汽轮机的冷源损失 ΔQ_c 由两部分组成,即理想冷源损失和由做功量减少造成的附加冷源损失,冷源损失率 ζ_c 为

$$\zeta_c = \frac{\Delta Q_c}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q_c}{Q_0} \frac{Q_0}{Q_b} \frac{Q_b}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \frac{Q_0}{Q_b} \left(1 - \frac{W_i}{Q_0}\right) = \eta_p \eta_b (1 - \eta_i) \quad (2-13)$$

若考虑给水泵消耗的功率 W_{pu} (kJ/h), 则汽轮机的净内效率 η_i^n 可表示为

$$\eta_i^n = \frac{W_i - W_{pu}}{Q_0} \quad (2-14)$$

(4) 汽轮机的机械损失及机械效率 汽轮机转动时产生的机械损失包括支撑轴承和推力轴承的机械摩擦损失, 以及拖动主油泵和调速器的功率消耗。它使汽轮机输出的有效功率(轴功率)总是小于其内功率。汽轮机输出给发电机的轴功率 P_{ax} (kW) 与汽轮机内功率 W_i 之比称为汽轮机的机械效率, 用 η_m 表示, 其表达式为

$$\eta_m = \frac{3600P_{ax}}{W_i} = 1 - \frac{\Delta Q_m}{W_i} \quad (2-15)$$

式中, ΔQ_m 是机械损失 (kJ/h); 3600 是电热当量, 1kW·h 的电能相当于 3600kJ 的热量。

汽轮机机械损失的热损失率 ζ_m 为

$$\zeta_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_{cp}} = \frac{Q_b}{Q_{cp}} \frac{Q_0}{Q_b} \frac{W_i}{Q_0} \left(1 - \frac{3600P_{ax}}{W_i}\right) = \eta_b \eta_p \eta_i (1 - \eta_m) \quad (2-16)$$

汽轮机的机械效率一般为 96.5% ~ 99.0%。

(5) 发电机的能量损失及发电机的效率 发电机的能量损失包括轴承摩擦机械损失、通风耗功和发电机内冷却工质的摩擦和铜损(由于绕组具有电阻而发热)、铁损(由于励磁铁心产生涡流而发热)而造成的功率消耗。发电机的效率 η_g 定义为发电机输出的电功率 P_e 与轴功率 P_{ax} 之比, 即

$$\eta_g = \frac{P_e}{P_{ax}} = 1 - \frac{\Delta Q_g}{3600P_{ax}} \quad (2-17)$$

式中, ΔQ_g 是发电机损失 (kJ/h)。

现代大型发电机的效率随冷却工质的不同而不同, 氢冷时为 98% ~ 99%, 空冷时为 97% ~ 98%, 双水内冷时为 96% ~ 98.7%。

发电机能量损失率 ζ_g 为

$$\zeta_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m (1 - \eta_g) \quad (2-18)$$

(6) 全厂能量损失及全厂发电热效率 对整个发电厂的生产过程而言, 全厂发电热效率表示发电厂有效利用的能量(电能 P_e) 与其消耗的能量(燃料完全燃烧时的放热量)之比, 即为全厂发电热效率, 其表达式为

$$\eta_{cp} = \frac{3600P_e}{Bq_{net}} = \frac{3600P_e}{Q_{cp}} = \eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g \quad (2-19)$$

此式表明, 凝汽式发电厂的全厂发电热效率取决于各设备或热力发电过程的分效率, 其中任一设备(或热力过程)经济性的改善都有助于全厂发电热效率的提高。纯凝汽式发电厂全厂的发电热效率一般为 26% ~ 35%, 可见在纯凝汽式发电厂中, 燃料的有效利用程度很低。

全厂发电热效率与分效率间的关系如图 2-2 所示。

从上述各设备(热力过程)热效率的数值范围可以看出, 发电厂的主要设备之一——汽轮机的内效率 η_i 最低, 与汽轮机内效率 η_i 相对应的冷源损失 ΔQ_c 是发电厂各项热损失中最大的。这是由于热量法中的能量损失是以散失到环境为准, 不区分能量品位的高低, 汽轮