

普通高等教育



“十五”

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

规划教材

电力工程概论

韦 钢 张永健 陆剑峰 丁会凯 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育



“十五”

规划教材

PUTONG
GAODENG JIAOYU
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

TM71
9

电力工程概论

编著 韦 钢 张永健 陆剑峰 丁会凯
主审 陈章潮 程浩忠



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十五”规划教材。全书共四篇,其中,第一篇为动力系统概述:能量转换基本知识、火力发电、水力发电、核能发电、新能源发电;第二篇为输配电系统概述:电力系统基本知识、电力系统运行特性及分析、电力系统的故障及分析、电力系统稳定性、电力系统规划及可靠性;第三篇为电气设备与保护控制概述:电气设备、发电厂和变电所的一次系统、电力系统保护与控制;第四篇电力市场建设概述:电力改革的市场化趋向、电力市场建设的基础性工作、我国电力市场建设实践。本书概要性地介绍了整个电力工业的基本情况,内容丰富,浅显易懂。

本书主要作为普通高等学校非电气类专业本科学生通识课程的教材,也可作为成人函授、高职高专教育的教学用书,还可作为电力行业相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力工程概论/韦钢等编著. —北京:中国电力出版社, 2005

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3015-3

I. 电... II. 韦... III. 电力工程—高等学校—教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 004975 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

2005 年 2 月第一版 2005 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 392 千字

印数 0001—4000 册 定价 26.00 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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

前 言

本书为普通高等教育“十五”规划教材。全书共分为四篇，第一篇动力系统概述，第二篇输配电系统概述，第三篇电气设备及保护控制概述，第四篇电力市场建设概述。

根据电力类高等学校人才培养的目标和定位，非电气类专业学生迫切需要概略性地了解有关电能的生产、电力系统的运行、电力市场的相关基础知识。由于学科基础课程的欠缺，以及学时数的限制，目前还较少有既全面又浅显的教材可供选择。据此，我们编写了这本《电力工程概论》，主要是作为电力类高等学校非电气类学生通识课程的教材。全书概要性地介绍了电力工程（动力、电气、电力市场）的相关基础知识，对内容中涉及到的理论以及繁杂的分析计算进行了大量的简化和定性的描述处理，全书贯穿的宗旨是“介绍性和说明性”，内容丰富，但又浅显易懂，对学生学习本书的先修课程的基础性要求较低，因此不论是理科、文科的学生，均可在任何一个学期开设本课程，教师在讲授中，可以根据不同的专业以及课时数的多少进行选择性地讲解。书中每一篇均附有一定数量的思考题，帮助学生在思考、复习本课程。

本书由上海电力学院韦钢（第二篇）、张永健（第三篇）、陆剑峰（第一篇）、丁会凯（第四篇）联合编著，韦钢负责全书的统稿。上海交通大学的陈章潮教授、程浩忠教授担任本书的主审，提出了一些宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。同时在此向本书所引用参考书目的作者表示感谢。

限于编者的水平，书中难免存在缺点和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

序 前言

第一篇 动力系统概述

第一章 能量转换基本知识	1
第一节 热力学基本定律	1
第二节 水蒸气动力循环	4
第三节 换热器（热交换器）	7
第二章 火力发电	8
第一节 火电厂生产过程	8
第二节 锅炉设备	10
第三节 汽轮机设备	17
第四节 火电厂对环境的影响及防止措施	25
第五节 蒸汽—燃气联合循环	27
第六节 洁净煤发电技术简介	30
第三章 水力发电	31
第一节 水电站的生产过程及类型	31
第二节 水电站主要动力设备——水轮机	36
第三节 水力发电的特点	38
第四章 核能发电	39
第一节 核裂变反应堆	39
第二节 压水堆核电厂生产过程	45
第三节 核电厂对环境的影响	46
第五章 新能源发电	48
第一节 地热发电	48
第二节 海洋能发电	51
第三节 太阳能发电	52
第四节 生物质能发电	58
第五节 风力发电	61
第六节 氢能发电	64
思考题	65

第二篇 输配电系统概述

第六章 电力系统基本知识	67
第一节 电力系统的基本组成	67
第二节 电压的变换和电能的传输	68
第三节 电力网络的接线和电压等级	74
第四节 电力系统负荷	76
第五节 电力系统中性点运行方式	79
第六节 电能的质量指标和电力系统的特点	84
第七章 电力系统运行特性及分析	86
第一节 电力系统的潮流分布	86
第二节 电力系统频率特性及调整	99
第三节 电力系统电压管理及调整	105
第八章 电力系统故障及分析	110
第一节 电力系统故障的基本概念	110
第二节 电力系统三相短路故障	112
第三节 电力系统不对称短路故障	121
第九章 电力系统稳定性	130
第一节 概述	130
第二节 电力系统静态稳定性	131
第三节 电力系统暂态稳定性	137
第四节 电力系统电压稳定性	144
第十章 电力系统规划及可靠性	145
第一节 电力系统规划	145
第二节 电力系统可靠性	148
思考题	152

第三篇 电气设备及 保护控制概述

第十一章 电气设备	153
第一节 发电机	153
第二节 发电机励磁系统	156
第三节 变压器	157
第四节 线路	160
第五节 高低压开关设备	162
第六节 母线、电缆	173
第七节 开关设备与导体的选择与使用	173
第八节 互感器	174

第十二章 发电厂、变电所的一次系统	179
第一节 发电厂、变电所电气主接线	180
第二节 发电厂、变电所自用电	184
第三节 直流系统	188
第四节 配电装置	189
第五节 过电压保护与接地保护	199
第十三章 电力系统保护与控制	208
第一节 继电保护基本原理	208
第二节 电力系统自动装置	216
第三节 发电厂、变电所的控制、信号回路	224
第四节 电力系统调度与自动化	225
思考题	234

第四篇 电力市场建设概述

第十四章 电力改革的市场化趋向	236
第一节 电力工业模式的综合描述	236
第二节 变化中的我国电力工业	240
第三节 国外电力改革与电力市场建设	240
第十五章 电力市场建设的基础性工作	243
第一节 电力市场主体的确立	243
第二节 电力市场模式选择	245
第三节 电力市场中的交易方式	246
第四节 电力市场中的电价问题	247
第五节 电力市场监管问题	249
第六节 电力市场运营规则框架	251
第十六章 我国电力市场建设实践	251
第一节 我国电力改革与电力市场建设回顾	252
第二节 发电侧电力市场	254
第三节 差价合约结算在发电侧电力市场竞价中的应用	255
思考题	261
参考文献	262

第一篇 动力系统概述

各种形式的能量相互之间可以进行转换，电能就是由一次能源转换而来的。具有一定转换规模、能连续不断对外界提供电能的工厂，称为发电厂。

由于一次能源种类和转换方式的不同，发电厂种类很多，但目前已成熟开发利用并大批量投入商业运营的发电厂，主要是火力发电厂（火电厂）、水力发电厂（水电站）和原子能发电厂（核电厂），而新能源发电在世界各国也相继开发利用，在将来会成为电能生产新的重要方式。

一次能源先转换成热能，通过原动机把热能转换成机械能，再拖动发电机将机械能转换成电能，这种电能的生产方式占了相当大的比例，如火力发电、核能发电、地热发电、太阳能热发电、垃圾焚烧发电、海洋温差发电等。这涉及热能到机械能的转换，因此有必要了解其中一些常识性知识，帮助理解各种电厂的生产原理。

第一章 能量转换基本知识

第一节 热力学基本定律

一、基本概念

能够将热能转换成机械能的动力设备称之为“热力发动机”（热机），而要完成能量转换所必须借助的中间媒介物质称之为“工质”，工质应具有良好的流动性和膨胀性，因此，热机都采用气（汽）态物质作为工质。火电厂的热机是汽轮机和燃气轮机，前者用蒸汽作工质，后者用化石燃料燃烧后产生的烟气作工质。工质在进入热机前，需从其他物体（如锅炉）吸取热能，这物体叫做“高温热源”（热源），而接受工质放出热能的物体（如凝汽器）称为“低温热源”（常称为冷源）。

在研究分析热能与机械功的转换时要选取一定的范围，称为“热力系统”（简称系统），系统外称为“外界”，交界面就是“边界”，边界可以是真实的或虚构的，也可以是固定的或移动的。系统的划分可以根据具体要求人为选定，如可以把图1-1动力部分作为一个热力系统，也可以将汽轮机选为一个热力系统，前者系统与外界只有能量交换而无物质交换是“闭口系统”；后者系统与外界既有能量交换又有物质交换是“开口系统”。如果系统与外界之间没有热量的交换则称为“绝热系统”，以后在分析汽轮机时，认为其向外界的散热很小，将汽轮机视为绝热系统。

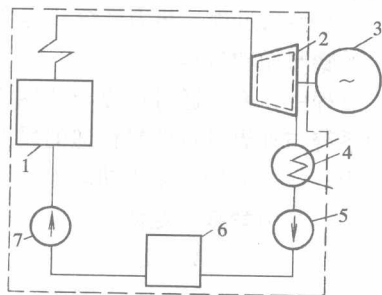


图 1-1 火电厂生产过程原理图

1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；
5—凝结水泵；6—回热加热器；7—给水泵

（一）常用参数

为了说明工质在某种状况(热力状态)下的特征,常用一些物理量来描述,如压力、温度、比体积(比容)、焓等,这些物理量就是参数。如果一个热力系统在不受外界影响的条件下,其状态能长时间保持不变,则系统处于“平衡状态”,只有在平衡状态时,才可以用参数来描述,以后分析时都认为系统处于平衡状态。

压力(p , 压强)、温度(T , 热力学温标)、比容(v , 与密度互为倒数)是前期课程接触过的三个基本状态参数,压力、比容是衡量单位工质做功能力大小的一个尺度。这里,还有一个热力学中经常用到的参数“焓”,焓(比焓)是用来衡量单位工质具有“热力势能”大小的一个尺度,符号用“ h ”表示,国际单位为“ J/kg 、 kJ/kg ”。

(二) 基本热力过程

要实现热能与机械能的转换需通过工质状态的变化才能完成,热力系统由其初始平衡状态,经过一系列中间状态变化而达到另一新的平衡状态,其中间的物理变化过程称为“热力过程”(过程)。过程的实现是平衡状态被打破的结果,但每一中间状态,既离开平衡状态,又无限接近于平衡状态,这样的过程称为“准平衡过程”。以后讨论的实际热力过程都视为准平衡过程。热力系统完成某一准平衡过程之后,若能够沿原变化返回其初始平衡状态,且对系统和外界均不留下任何影响,则称该过程为“可逆过程”(理想过程),反之则为“不可逆过程”。实际中的热力过程都是不可逆过程,因为过程中存在着各种各样的能量损失,系统与外界不可能不留下变化而返回到初始状态。显然,可逆过程只是研究分析时一种需要的想象。如果系统经历若干个不重复的过程,最终又回到初始状态,所形成的封闭的热力过程叫做“热力循环”(循环)。

常见的基本热力过程有:

(1) 定压过程:热力系统状态变化过程中,工质的压力保持不变。如工质在锅炉内的吸热过程。

(2) 定温过程:热力系统状态变化过程中,工质的温度保持不变。如工质在凝汽器内的放热过程。

(3) 定容过程:热力系统状态变化过程中,工质的比容保持不变。如工质在汽油机内的加热过程。

(4) 绝热过程:热力系统状态变化过程中,工质与外界无任何热量交换。如工质在汽轮机内的膨胀做功过程。

过程中,系统通过边界与外界传递的能量即热量与功。热量与功是过程量,是用来衡量热力系统与外界进行能量传递的尺度,只有在能量的传递过程中,才可以讲系统与外界传递了多少热量或者做了多少功。

二、热力学基本定律

(一) 热力学第一定律

能量守恒及转换定律是自然界的基本规律,即自然界中一切物质都具有能量,能量不可能被创造,也不可能被消灭;但能量可以从一种形态转变为另一种形态;在能量的转化过程中能的总量保持不变。热力学第一定律就是能量转换及守恒定律在热现象上的应用,指出了热能和各种能量之间的转换和能量守恒,可以这样表述,“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”。其基本表达形式为

进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统储存能量的增加

在实际的热力设备中进行能量转换,工质要在热力装置中循环不断地流经相互衔接的热力设备(如图1-1所示),完成不同的热力过程,才能实现热与功的转换,分析上述各种热力设备时,常把它们看作开口系统(如锅炉、汽轮机),并且认为工质在流经热力设备时:流入和流出系统的质量流量不随时间变化,系统任何一点的参数和流速不随时间变化,系统内的储存能不随时间变化,单位时间内加入系统的热量和系统对外所做的功也不随时间改变。这样的流动过程称为“稳定流动”。很多实际的流动过程都可以作为稳定流动过程处理。这样热力学第一定律在开口系统可以简化为

进入系统的能量 = 离开系统的能量

上述概念在动力循环中应用广泛,如蒸汽在汽轮机内的膨胀做功过程。由于蒸汽通过汽轮机时向外界的散热很少,可认为是绝热系统,并忽略进出口的势能差与动能差,在理想情况下单位工质对汽轮机所做的功为

$$w = h_1 - h_2$$

(二) 热力学第二定律

两个温度不同的物体相互接触时热量总是自发地从高温物体传向低温物体,高温物体失去的热量等于低温物体得到的热量,但是反过来却不可能自发进行。事实上,一切自然过程都具有方向性,而热力学第一定律只是指出了能量之间可以相互转换,以及转换过程中的数量关系,而没有说明这种转化的方向、条件和深度。热力学第二定律是能量转化规律更为深化的定律,也是建立在长期无数经验积累基础之上的,它指出了一切自然过程的不可逆性。热力学第二定律就是解决与热现象有关的各种过程进行的方向、条件和深度等问题的定律。

热力学第二定律的表述方法有各种各样,但其本质是一样的,这里给出几种典型的说法:

(1) 热不可能自发地、不付代价地从低温物体传向高温物体。

(2) 凡是有温度差的地方都能产生动力。

(3) 不可能制造出从单一热源吸热,使之全部转化成为功而不留下其他任何变化的热力发动机。(第二类永动机是不可能存在的)。

热力学第二定律指出,只从一个热源吸热而连续做功的循环发动机是造不成功的,就是说热向功的转化过程是非自发的,要使过程得以进行,必须付出一定的代价,此代价就是使部分从高温热源获取的热量排向低温热源,即系统从高温热源吸取的热量中,除一部分转变成功外,另一部分必须排放到低温热源(冷源损失不可避免),热机不可能将热能全部转变为机械能。

著名的卡诺循环(由两个等温过程和两个绝热过程组成)是实际动力循环中效率最高的理想循环,它在理论上确定了一定范围内热能转变为机械功的最大限度,为实际循环的组成及热效率的提高指出了方向与途径,其循环的热效率表达式为

$$\eta_1 = 1 - T_2/T_1$$

由上式得出一些重要结论如下:

1) 循环热效率决定于高温热源与低温热源的温度 T_1 和 T_2 , 提高工质吸热温度并且尽可能降低工质排向冷源 (大气环境) 的温度, 可提高循环热效率。

2) 循环热效率永远小于 100%, 因为 $T_1 = \infty$ 和 $T_2 = 0$ 都是无法实现的, 这正是热力学第二定律所揭示的规律。

3) 当 $T_1 = T_2$ 时, 循环热效率为零。这就是说, 在没有温差存在的体系中, 热能不可能转变为机械功, 要利用热能来产生动力, 就一定要有温度高于环境的高温热源。

4) 在两个不同温度的恒温热源间工作的一切可逆循环, 均具有相同的热效率, 且与工质的性质无关。

5) 在两个不同温度的恒温热源间工作的任何不可逆循环, 其热效率必低于在两个同样恒温热源间工作的可逆循环。实际循环都是不可逆循环, 其热效率必低于同温限的卡诺循环。

第二节 水蒸气动力循环

一、水蒸气的基本性质

在常规火电厂的动力循环中以水蒸气作为工质, 它是在锅炉中定压下由水加热而形成的, 通过分析水蒸气的定压形成过程, 可以了解它的基本性质。

取 1kg 温度为 0°C 的水在定压下对其加热, 水温随着加热逐渐提高, 升高到一定温度时, 水开始沸腾, 其对应的温度称为“饱和温度” (沸点), 此时的水为“饱和水”, 低于饱和温度的水为过冷水 (未饱和水)。饱和温度和压力是一一对应的, 压力增大其对应的饱和温度也相应升高。反之, 降压将使得饱和水汽化, 扩容器就是利用这一基本性质。

对饱和水继续定压加热, 水开始汽化产生蒸汽 (饱和蒸汽), 水温并不升高维持饱和温度不变, 这时处于汽水两相共存的饱和状态, 通常把饱和水和饱和蒸汽的混合物称为“湿饱和蒸汽” (湿蒸汽), 可以用干度 x 来表示湿蒸汽中饱和蒸汽占总量的份额 (湿蒸汽中纯饱和蒸汽的质量百分数)。随着汽化的进行, 当湿蒸汽中的最后一滴水变成蒸汽 (即 $x = 1$), 此时的蒸汽称为“干饱和蒸汽”, 其温度仍然是饱和温度。

继续对干饱和蒸汽定压加热, 蒸汽的温度开始逐渐升高, 此时的蒸汽称为“过热蒸汽”。过热蒸汽的温度与其饱和温度的差值, 称为过热度。

因此, 过冷水定压加热成过热蒸汽, 经历了三个阶段: ①过冷水加热到饱和水的预热阶段, 所需的热量为预热热; ②饱和水汽化成干饱和蒸汽的汽化阶段, 所需的热量为汽化潜热; ③干饱和蒸汽加热成过热蒸汽的过热阶段, 所需的热量为过热热。过冷水、饱和水、湿蒸汽、干饱和蒸汽、过热蒸汽是加热过程中涉及到的五个典型状态, 其中饱和水和干饱和蒸汽状态是定压力下的两个惟一状态点, 其他可具有无限多个状态点。

在加热过程中, 工质的比容、焓值持续增大, 只不过从过冷水到饱和水比容的增加不大, 而饱和水到饱和汽比容迅速增大, 且定压力值越低饱和汽与饱和水的比容差值越大, 但随着压力的提高, 饱和汽与饱和水的比容差值越来越小。当压力升高到某一值时, 饱和汽与饱和水的比容差值为零, 即饱和汽与饱和水没有差别, 具有相同的状态参数且汽化潜热等于

零,此时的状态点为“临界点”,所对应的参数为临界参数即 $p_{cr} = 22.129\text{MPa}$, $t_{cr} = 374.15^\circ\text{C}$ 。这表明:当蒸汽温度大于临界温度时,加压不能使水蒸气液化。

随着压力的提高,预热热增大,汽化潜热减少,过热热增大,因此大容量、高参数的锅炉的受热面布置与小容量、低参数的锅炉的受热面布置有所不同。

二、水蒸气动力循环

以水蒸气为工质的动力循环,难以实现卡诺循环,而是按照实际可行的循环进行的,其最基本的循环是朗肯循环并以此为基础加以改进,而得到再热、回热、热电联产等循环。

(一) 朗肯循环

图 1-2 是以水蒸气为工质的基本朗肯循环装置示意图。由给水泵打出的高压给水,经锅炉加热、汽化、过热三个阶段被加热成高温、高压的过热蒸汽,送入汽轮机膨胀做功将蒸汽热能转换成机械能,从汽轮机排出的低温、低压蒸汽引入凝汽器凝结成水再由水泵重新打回锅炉,完成封闭的朗肯动力循环。

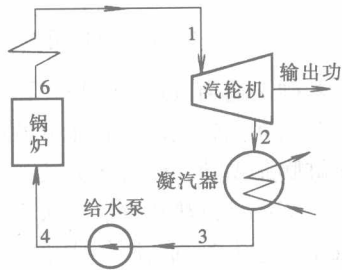


图 1-2 基本朗肯循环

因此以水蒸气为工质的动力循环是由以下四个理想的基本热力过程构成的：

(1) 1→2 为过热蒸汽在汽轮机内的理想绝热膨胀做功过程,所做的功为 $w = h_1 - h_2$;

(2) 2→3 为乏汽(即汽轮机排汽)向凝汽器(冷源)的理想定压放热的完全凝结过程,其放热量为 $q_2 = h_2 - h_3$;

(3) 3→4 为凝结水通过水泵的理想绝热压缩过程,所消耗的功为 $w_p = h_4 - h_3$;

(4) 4→1 为高压水在锅炉内经定压加热、汽化、过热而成为过热蒸汽的理想定压吸热过程,所吸收的热量为 $q_1 = h_1 - h_4$ 。

由此可知,1kg 工质按照朗肯循环工作每循环一次向外输出的净功 w_0 为汽轮机输出功与水泵耗功之差,即

$$w_0 = w - w_p = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$$

这样,朗肯循环的热效率为

$$\eta_t = w_0/q_1 = [(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)]/(h_1 - h_4)$$

因水泵耗功所占比例很小,在分析时可忽略不计,上式可简化为

$$\eta_t = (h_1 - h_2)/(h_1 - h'_2)$$

由上式可知,循环热效率 η_t 取决于 h_1 、 h_2 、 h'_2 (h_3 为排汽压力下的饱和水焓,故用 h'_2 代之)的大小,提高 h_1 以及降低 h_2 、 h'_2 可以使 η_t 增加。而 h_1 是汽轮机的进汽焓,其值取决于蒸汽的初压和初温; h_2 、 h'_2 分别是排汽压力下的排汽焓和饱和水焓,显然取决于排汽压力的高低。

为了提高蒸汽动力装置循环的热效率,应尽可能提高蒸汽的初压和初温并降低排汽压力。现在亚临界(17MPa 左右)、超临界(23MPa 以上)压力得到广泛应用,但提高初温受金属材料耐热性能的限制,国内的蒸汽初温一般控制在 540°C 左右。

降低汽轮机的排汽压力可以使工质向冷源的放热量减少,从而提高循环热效率 η_t 。但因

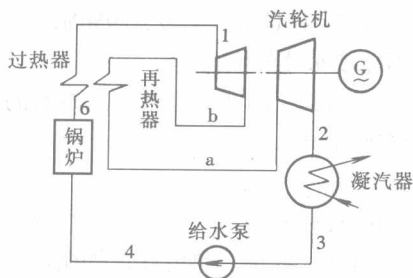


图 1-3 中间再热循环

排汽压力的降低受到了环境温度的限制，通常为 5kPa 左右。对于同一设备，冬季的冷却水温低于夏季，相应的排汽压力也低，循环热效率要高一些。

（二）中间再热循环

前面指出提高蒸汽的初压、降低排汽压力可以提高循环热效率，但蒸汽排出汽轮机的干度随之降低，使汽轮机的内部损失增加、末几级叶片受湿蒸汽的冲蚀加剧，影响汽轮机的安全、经济运行。因此排汽的干度不能太低（一般 $x \geq 0.88$ ），在朗肯循环

的基础上适当改进，采取“再热”的方法（如图 1-3 所示）可提高排气干度。

蒸汽在汽轮机内的膨胀分两段进行。锅炉过热器出来的蒸汽（一次蒸汽）进入汽轮机的高压缸膨胀做功，做过部分功的高压缸排汽通过管道送回锅炉内的再热器重新加热，温度提高后，蒸汽（再热蒸汽、二次蒸汽）又返回到汽轮机的中、低压缸继续膨胀做功，直至达到排汽压力进入凝汽器凝结成水由水泵打回锅炉，完成一次中间再热循环。

采用再热循环时的最初目的是为了提提高汽轮机排汽的干度，而不是为了提高循环热效率，但如果再热压力选择得当（一般为新汽压力的 20% ~ 30%），同样可以提高循环热效率（约 4% ~ 5%）。

采用中间再热有利于提高初压、保证汽轮机末级蒸汽干度、提高循环热效率，此外因每公斤蒸汽的做功量增加，汽轮机的汽耗量减少。但是采用中间再热，需要在锅炉中布置再热器，在汽轮机和锅炉之间增设往返蒸汽管道、阀门等，机组投资增大、运行管理复杂。参数低的小机组不用中间再热循环，只有超高压（13.7MPa）以上的火电机组采用一次中间再热。

（三）回热循环

朗肯循环在采取了提高初参数、降低终参数以及再热等措施后，其热效率还是不高，其原因是朗肯循环中有相当大的一部分热量（50% 以上）在凝汽器中被冷却水带走而损失掉了，因此提高循环热效率的关键是如何减少这部分损失，在基本朗肯循环基础上采用“给水回热”的方法是有效手段。具有给水回热的循环称为“回热循环”，所有以水蒸气为工质的动力循环都采用此方式。

图 1-4 是有一级给水回热的回热循环装置示意图。1kg 的新蒸汽进入汽轮机中绝热膨胀做功，有 α kg 的蒸汽在某一中间压力下被抽出，引入回热加热器定压凝结放热成为 α kg 的饱和水，其余的 $(1-\alpha)$ kg 蒸汽继续在汽轮机内绝热膨胀做功，直至达到排汽压力进入凝汽器凝结成水由水泵送入加热器，接受由蒸汽放出的热量，并与 α kg 的蒸汽凝结的水汇成 1kg 抽汽压力下的饱和水，由给水泵打回锅炉，完成封闭的回热循环。

可以这样理解，回热循环是由两个循环组合而成：

$(1-\alpha)$ kg 的工质按基本朗肯循环进行，其效率与朗肯

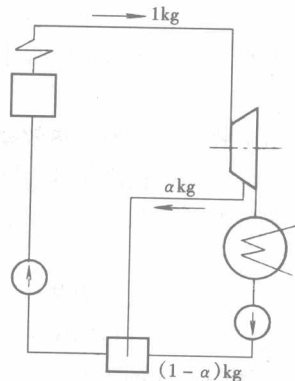


图 1-4 回热循环

循环效率相同； $\alpha \text{ kg}$ 的工质仅吸热做功而不向冷源排热，它放出的热量为工质本身所吸收，这部分工质的循环效率可以认为等于 100%。两部分组合后的循环总效率必大于原基本朗肯循环，采用回热循环热效率可提高 8% ~ 15%。

实际应用不止一级给水回热，级数越多回热循环的热效率越高，越接近卡诺循环的热效率，但随着级数增加，回热循环热效率增加的幅度减少且投资及运行成本大幅增加，目前超高压以上机组一般采用 7 ~ 9 级抽汽的给水回热循环系统。

(四) 热电联产循环

从热力学第二定律可知，冷源损失是不可避免的。蒸汽动力循环即使采用提高初参数、降低排汽压力、再热、回热等措施，循环热效率很难超过 50%，大量的蒸汽低温热量因其温度水平太低，没有利用的价值，只能通过凝汽器冷却水散失到环境中。

而现实的生活、生产中热能（蒸汽、热水）的利用非常广泛、需求量也很大，并且这些热能的需要对工质参数要求相对于动力循环中的蒸汽初参数要低得多，但又高于汽轮机的排汽参数。如果适当提高排汽参数，将排汽直接送给热用户利用，既满足了热用户对热能的需求，又可避免动力循环中的冷源损失，这就是“热电联产循环”——将电能生产和热能生产联成一体，既供热又供电，这类火电厂叫做热电厂（如图 1-5 所示）。

热用户自己生产热能（如常见的工业锅炉）通常存在能耗高、环境污染严重的问题，热电联产是节约能源、改善环境质量的有效措施之一，具有很高的综合效益。

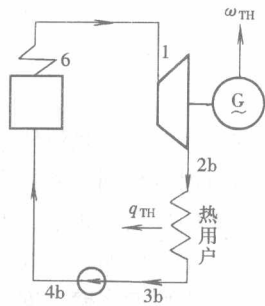


图 1-5 热电联产循环

第三节 换热器（热交换器）

换热器是实现冷热流体热量交换的设备，对冷流体来说是被加热，对热流体来说是被冷却。因此，通常所说的加热器也就是冷却器。换热器在火电厂的热力系统中应用非常广泛。

按其工作原理，换热器一般可分为混合式、表面式和再生式三大类。

(1) 混合式换热器：冷、热流体通过直接接触彼此混合来完成热量交换，同时也存在质量交换。混合式换热器具有换热效率高、设备简单的优点，但因冷热流体直接混合，其应用受到限制。如火电厂中给水除氧器就属于混合式换热器。

(2) 表面式换热器：冷、热流体被固体壁隔开，分别在其两侧流过，借助于固体壁，热流体的热量传给冷流体，故又称为间壁式换热器。表面式换热器是火电厂应用最多的一类。如锅炉中的各汽水受热面、回热加热系统中的高、低压加热器等。

(3) 再生式换热器：冷热流体先后交替地流过同一固体换热壁面，热流体流过时将壁面加热并储蓄热量，冷流体流过时则壁面放出热量并加热冷流体，这样借助壁面的蓄、放热过程，使热流体的热量传给冷流体，又称回热式换热器。大容量锅炉中采用的回转式空气预热器就属于这类换热器。

表面式换热器有两种基本布置方式,即顺流式和逆流式布置(如图1-6所示),其他布置是在基本方式上派生出来的,称为混合流布置。

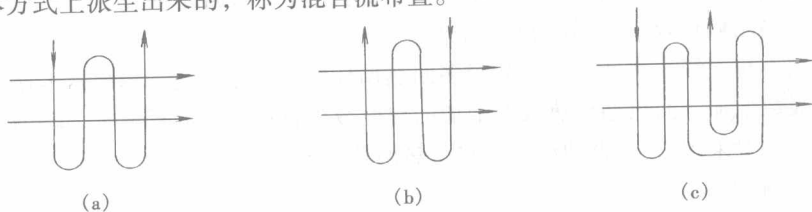


图1-6 流体在换热器内的相对流向

(a) 顺流; (b) 逆流; (c) 混合流

顺流布置,冷热流体总体上同向流动;逆流布置,冷热流体总体上反向流动。在冷热流体进出口温度相同的条件下,逆流式的传热平均温差较顺流时为大,可以获得较好的传热效果,所需的换热面积小,但两种流体的最高温度集中在换热器的同一端面上,容易造成该端面的金属壁超温而导致毁坏,没有顺流式安全。因此,在安全允许的条件下,尽量采用逆流式布置,需要考虑壁面安全时,则采用顺流式布置,或低温段采用逆流布置而高温段采用顺流布置即混合流布置。在锅炉内的各受热面的布置就突出了这一原则。

第二章 火力发电

火力发电厂简称火电厂,是利用煤、石油、天然气或其他燃料的化学能生产电能的工厂。我国电源构成是以火电为主,至2003年底火电装机容量为28564万kW,占全国发电装机总容量的74.3%。火电厂按使用燃料的不同可分为燃煤、燃油和燃气等几类电厂。我国的煤炭资源比较丰富,燃煤火电厂是我国目前电能生产的主要方式。

第一节 火电厂生产过程

火电厂按燃料不同、热机不同有不同的类型。按照原动机不同可分为汽轮机电厂、燃气

轮机电厂、蒸汽—燃气轮机联合循环电厂。但从能量转换观点分析,其基本过程都是:燃料的化学能→热能→机械能→电能。

图1-7是蒸汽动力(汽轮机)发电厂的原理图。燃料送入锅炉1燃烧放出大量的热量,锅炉中的水吸收热量成为高压、高温的蒸汽,经管道有控制地送入汽轮机2,蒸汽在汽轮机内降压降温,其热能转换成汽轮机转轴旋转机械功,高速旋转的汽轮机转轴拖动发电机3发出电能,电能由升变电设备送入电力系统,

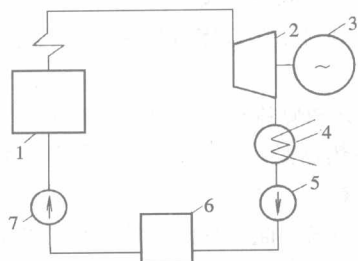


图1-7 蒸汽动力发电厂原理图

1—锅炉;2—汽轮机;3—发电机;4—凝汽器;
5—凝结水泵;6—回热加热器;7—给水泵