

火力发电厂热力学基础

北京电业管理局北京电力学校

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书密切结合火力发电厂的实际,从理论上介绍热能转化为机械能的规律,分析如何提高这种转化效率的方法。书中叙述了气体的基本概念、水蒸汽的性质、热力过程、水蒸汽的热力循环及其分析、气体和蒸汽的流动等主要内容,并附有最新的水蒸汽性质计算图和表。

本书可供火力发电厂热机专业和其他工业部门热工专业的工人参考。

火力发电厂热力学基础

北京电业管理局北京电力学校

(根据水利电力出版社原型重印)

*

电力工业出版社出版

(北京前门外大街六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

顺义县印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 12.75印张 280千字 2插页

1976年11月北京第一版

1980年12月新一版 1989年12月北京第一次印刷

印数35331—42416册 定价 1.20元

书号15036·4136

目 录

前 言	
概 述	1
第一节 火力发电厂的电能生产过程	1
一、汽水系统 二、燃烧系统 三、电气系统	
四、火力发电厂的容量、参数、效率	
第二节 火力发电厂热力学基础研究的对象、任务和方法	6
第一章 基本概念	8
第一节 分子和分子运动	8
第二节 功与功率	10
一、功 二、功率	
第三节 能	15
一、动能 二、位能 三、热能	
第四节 热量、比热、热容量、热平衡方程	18
一、热量 二、比热 三、热容量 四、热平衡	
第五节 能量守恒与转换定律	23
思考题与习题	24
第二章 工质及其基本状态参数	25
第一节 工质、理想气体和实际气体	25
第二节 温度	27
一、温标 二、温度测量的一般知识	
第三节 压力	32

一、压力的概念 二、气体压力的形成 三、压力的单位 四、大气压力 五、绝对压力、表压力和真空 六、压力测量的一般知识	
第四节 比容和重度	50
思考题与习题	51
第三章 理想气体定律	55
第一节 理想气体压力、温度、比容之间的关系	55
一、气体状态发生变化时，压力、比容、温度的变化规律 二、任一状态下气体压力、比容、温度之间的关系	
第二节 莫尔	63
补充内容	64
思考题与习题	67
第四章 气体的比热和热量	68
第一节 比热的基本概念	68
一、什么叫气体比热 二、影响比热的因素	
第二节 比热的分类	71
一、按气体的单位分 二、按加热过程的性质分	
第三节 应用比热计算热量	74
一、定比热和平均比热 二、应用定比热计算热量 三、应用平均比热计算热量	
思考题与习题	82
第五章 热力学第一定律和气体的热力过程	84
第一节 气体状态的变化和 $p-v$ 图	84
第二节 气体的内能	90
第三节 热力学第一定律	91

第四节	理想过程 and 实际过程	95
第五节	定容过程	95
第六节	定压过程	97
第七节	气体的状态参数——焓	98
第八节	定温过程	103
第九节	绝热过程	106
	思考题与习题	111
第六章	热力循环及热力学第二定律	113
第一节	热力循环及热效率	113
	一、循环 二、循环热效率	
第二节	热力学第二定律	116
	一、热力学第二定律的几种说法 二、热力学第二定律在热力学中的作用	
第三节	卡诺循环	119
	一、卡诺循环的组成 二、卡诺循环热效率的计算	
	三、卡诺循环热效率的分析 四、卡诺循环在热力学中的意义	
第四节	熵和温熵图 ($T-s$ 图)	123
	一、熵 二、温熵图的应用	
第五节	在温熵图上循环热效率的分析	126
	思考题与习题	129
第七章	汽化和凝结	130
第一节	汽化和凝结	131
	一、汽化 二、凝结	
第二节	汽、液转化和饱和状态	136
	一、汽、液相互转化的根本原因 二、饱和状态	
	三、饱和温度和饱和压力的关系	
第三节	汽化热和凝结热	141

一、汽化热	二、凝结热	
思考题与习题		143
第八章 水蒸汽		145
第一节 水蒸汽的产生过程		145
一、水蒸汽在锅炉中的形成过程	二、水蒸汽的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	
三、压力升高对锅炉的影响		
第二节 水蒸汽某些状态参数的计算		157
一、水	二、干饱和蒸汽	三、湿饱和蒸汽
四、过热蒸汽		
第三节 水蒸汽表		160
第四节 水蒸汽的焓熵图		165
第五节 水蒸汽的热力过程		168
一、定压过程	二、绝热过程	三、定温过程
四、定容过程		
思考题与习题		177
第九章 气体和蒸汽的流动		179
第一节 工质有流动时热力学第一定律及其在火力发电厂中的应用		180
一、连续性方程式	二、推动功(流动功)	三、工质有流动时的热力学第一定律
四、能量方程式在火力发电厂中的应用		
第二节 喷管和扩压管的作用		189
一、喷管	二、扩压管	
第三节 通过喷管的流速和流量		191
一、气体通过喷管时流速的计算	二、气体通过喷管时流量的计算	
第四节 临界压力比、临界速度、最大流量		195
一、临界压力比	二、临界速度	三、最大流量

第五节 渐缩喷管及缩放喷管的计算	200
一、渐缩喷管的计算 二、缩放喷管的计算	
第六节 喷管的选择及截面计算	203
一、喷管的选择 二、截面尺寸的计算	
第七节 蒸汽在喷管中的实际流动过程	206
一、实际流动过程流速的计算 二、速度系数	
三、喷管能量损失	
第八节 节流及其应用	211
一、节流 二、节流过程的一般分析 三、理想气体	
的绝热节流 四、水蒸汽的绝热节流 五、绝热	
节流过程中蒸汽能量的变化 六、节流在工程上	
的应用	
思考题与习题	222
第十章 蒸汽动力装置循环	225
第一节 水蒸汽作为工质的卡诺循环	225
第二节 蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	228
一、循环的装置系统图 二、循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	
三、朗肯循环热效率 四、汽耗率、热耗率和煤	
耗率 五、蒸汽参数对热效率的影响 六、有摩	
阻的实际循环	
第三节 给水回热循环	247
一、回热循环装置 二、回热循环在 $T-s$ 图上的表示	
三、回热循环的计算 四、回热循环的分析	
第四节 中间再热循环	258
一、中间再热的目的 二、中间再热循环装置 三、	
中间再热循环在 $T-s$ 图上的表示 四、中间再热	
循环热效率的计算 五、中间再热循环的分析	
六、中间再热循环的实例	

第五节 热电合供循环	264
一、背压式汽轮机 二、调节抽汽式汽轮机	
三、热电合供循环的分析	
第六节 蒸汽-燃气联合循环	269
一、燃气轮机装置的简单介绍 二、蒸汽-燃气联合循环	
思考题与习题	275
第十一章 混合气体	278
第一节 什么是混合气体	278
一、混合气体 二、分析混合气体的方法	
第二节 分压力与总压力	279
一、分压力 二、总压力	
第三节 分容积与总容积	280
一、分容积 二、总容积	
第四节 混合气体的成分表示法	281
一、用重量百分数表示 二、用容积百分数表示	
第五节 分压力的计算	283
一、已知某种气体的容积百分数 r_i 求分压力 p_i	
二、已知某气体的重量百分数 g_i 求分压力 p_i	
第六节 混合气体的比热	286
一、已知容积百分数求混合气体的容积比热 二、已知重量百分数求混合气体的重量比热	
思考题与习题	289
第十二章 湿空气	291
第一节 饱和湿空气、未饱和湿空气和露点	291
一、湿空气的总压力 二、未饱和湿空气和饱和湿空气 三、露点	
第二节 绝对湿度和相对湿度	295

一、湿度	二、相对湿度的测定	
第三节	湿空气的参数	301
第四节	湿空气的焓湿图	304
第五节	冷水塔和干燥器	306
一、冷水塔	二、干燥器	
第六节	湿空气对生产及生活的影响	312
思考题与习题		313

附 录

附表一	定压下气体的平均重量比热	314
附表二	定压下气体的平均容积比热	315
附表三	定容下气体的平均重量比热	316
附表四	定容下气体的平均容积比热	317
附表五	饱和水和饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	318
附表六	饱和水和饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	323
附表七	水和过热蒸汽性质表	331
附表八	常用单位换算表	357

一、长度单位换算表 二、面积单位换算表 三、体积单位换算表 四、重量单位换算表 五、温标换算表 六、压力单位换算表 七、不同海拔高度的大气压力 八、重度单位换算表 九、功及热量单位换算表 十、功率单位换算表

习题提示和解答	362
附图一 湿空气的 $I-d$ 图	396
附图二 水蒸汽的 $i-s$ 图 (莫里尔焓-熵图)	

概 述

第一节 火力发电厂的电能生产过程

电能 在工农业生产及人们的日常生活中被广泛地利用着，因为它可以很方便地转换为其它形式的能量，如机械能、热能、声能、光能、化学能等等。同时，其它形式的能也可以转换成电能，如燃料的化学能、水能、太阳能、原子能等等。

生产电能的工厂叫发电厂，利用煤、石油和天然气等燃料发电的电厂叫火力发电厂，又发电又供热的火力发电厂叫做热电厂。

在这一节中我们将以燃用煤粉的发电厂为例来简单地介绍现代火力发电厂电能的生产过程。

烧煤粉的火力发电厂的生产过程是：经过磨制的煤粉送到锅炉中燃烧，放出热量，加热锅炉中的给水，产生具有一定温度和压力的蒸汽。这个过程是把燃料的化学能转换成蒸汽的热能。再将具有一定压力和温度的蒸汽送入汽轮机内，冲动汽轮机转子旋转。这个过程是把蒸汽的热能转换成汽轮机轴的机械能。汽轮机带动同一轴上的发电机旋转而发出电来。这一过程是把机械能转换为电能。根据上述火力发电厂的生产过程，其生产系统主要包括汽水系统，燃烧系统及电气系统，现分述如下。

一、汽水系统

汽水系统由锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵等组成，它包

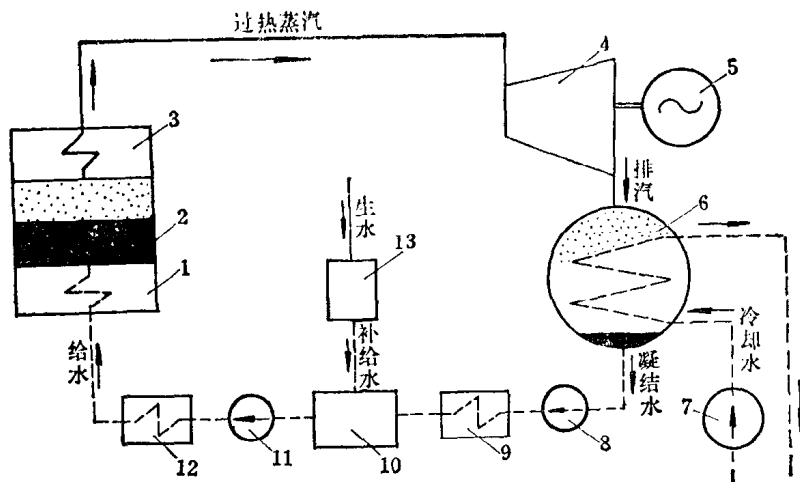


图 0-1 汽水系统流程简图

- 1—省煤器；2—水冷壁；3—过热器；4—汽轮机；5—发电机；
6—凝汽器；7—冷却水泵；8—凝结水泵；9—低压加热器；
10—除氧器；11—给水泵；12—高压加热器；13—水处理设备

括汽水循环系统、水处理系统、冷却水系统等。其原理系统图如图 0-1 所示。

水在锅炉中被加热后蒸发成为蒸汽。蒸汽进入过热器 3 中，进一步被加热成过热蒸汽，然后通过蒸汽管道将过热蒸汽引入汽轮机 4 中。在汽轮机中，蒸汽不断膨胀，流速增大。高速流动的蒸汽冲动汽轮机的转子并带动发电机 5 发电。在膨胀过程中，蒸汽的压力和温度不断降低，最后排入凝汽器 6 中。

在凝汽器中，汽轮机的排汽被冷却水冷却，凝结成凝结水。冷却水由冷却水泵 7 送入。

在凝汽器下部的凝结水由凝结水泵 8 升压后，依次流经低压加热器 9 和除氧器 10，提高水的温度并除去水中的氧，以

防止炉管腐蚀。再由给水泵 11 进一步升高水压,然后经过高压加热器 12 继续提高水温后重新打回锅炉,构成一个闭合的热力循环系统。给水泵以后的凝结水称为给水。

汽水系统中的蒸汽和凝结水,在工作过程中总会有一些损失。为了维持锅炉的一定蒸发量,必须不断地向系统中补充经过化学处理的水或蒸馏水。补给水通常是通过除氧器进入系统的。在图 0-1 中,生水是通过水处理设备 13 后成为合格的补给水,然后进入除氧器 10。

二、燃烧系统

燃烧系统包括锅炉的燃烧设备部分及输煤和除灰设备等。燃烧系统的任务是供应锅炉燃烧所需用的燃料及空气,进行完好的燃烧,产生具有一定压力和温度的蒸汽,并排除燃烧后的产物——烟气及灰渣。

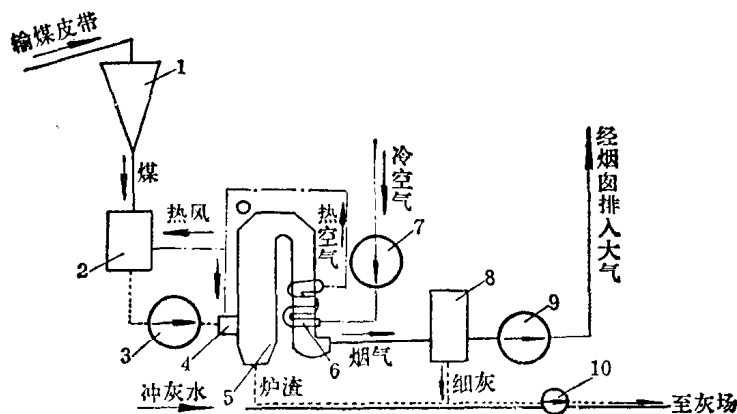


图 0-2 燃烧系统流程示意图

1—原煤斗；2—磨煤机；3—排粉机；4—喷燃器；5—锅炉；
6—空气预热器；7—送风机；8—除尘器；9—吸风机；10—灰浆泵

燃烧系统的流程示意图如图0-2所示,它的一般工作过程是:煤先由输煤皮带输送到锅炉房的原煤斗1中,再由原煤斗进入磨煤机2,同时由锅炉来的热空气也进入磨煤机。热空气是冷空气通过送风机7进入空气预热器6中升高温度而成。煤在磨煤机中被干燥并磨成煤粉,然后和经过预热的空气一道通过喷燃器4喷入锅炉5中燃烧。燃烧后的热烟气经锅炉的各个受热面传递热量后,温度逐渐降低离开锅炉5,经除尘器8清除烟气中的灰尘后由吸风机9抽出,通过烟囱排入大气。

由锅炉下部排出的灰渣和由除尘器下部排出的细灰,通常是用水冲至灰浆泵房,经灰浆泵10升高压力后排至贮灰场。

三、电气系统

电气系统如图0-3所示。发电机1发出的电能除发电厂自用一部分外,一般由主变压器2升高电压后,经高压配电装置3和输电线路向外供电。发电厂自用部分称做厂用电,一般占发电量的8%左右。在电能输送过程中,升高电压的目的是为了便于长距离输送和减少电能在线路上的损失。发电厂自用部分通常由厂用变压器4降低电压后,经厂用配电装置5和电缆供厂内各种辅助机械及照明等用电。

为了安全可靠和经济地发供电,常把两个或多个发电厂与变电所,送电线路,配电网以及用户联在一起,组成一个发、供、用的整体,称为电力系统或电力网。

综上所述,火力发电厂的电能生产过程是一个能量转换的过程。这个过程是由发电厂的三大主要设备(锅炉、汽轮机、发电机)和一些辅助设备来实现的,即:

1. 在锅炉中,将燃料的化学能转换为蒸汽的热能;
2. 在汽轮机中,将蒸汽的热能转换为汽轮机轴的旋转机

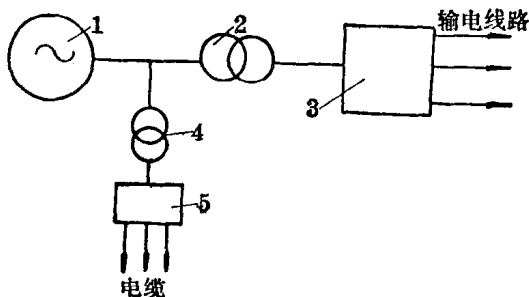


图 0-3 电气系统示意图

1—发电机；2—主变压器；3—高压配电装置；4—厂用变压器
5—厂用配电装置

机械能；

3. 在发电机中，将机械能转换为电能。

火力发电厂的整个生产过程及主要设备和系统连接概况见图 0-4。

四、火力发电厂的容量、参数、效率

火力发电厂容量的单位是瓩，符号是 KW 。每一台机组的发电能力的瓩数称单机容量或机组容量。发电厂的所有机组的发电能力的瓩数称发电厂装机容量。

锅炉的容量，是指锅炉每小时所生产的蒸汽数量，又称蒸发量或出力，单位是吨/小时。

汽轮机的容量是用它的发电能力来表示的，即用它所带动的发电机的发电能力来表示，单位也是瓩。

蒸汽参数指的是蒸汽压力和蒸汽温度，简称汽压和汽温。汽压的单位是绝对大气压，单位是公斤/厘米²，符号是 ata ；汽温的单位是摄氏温度，符号是 $^{\circ}C$ 。锅炉蒸汽参数指的是锅炉出口处过热蒸汽的压力和温度；汽轮机蒸汽参数指的是汽轮机

进口处蒸汽的压力和温度。

蒸汽参数,机组容量和发电厂容量之间是有一定关系的。

在火力发电厂电能生产过程的各个环节中都伴随有能量损失。除去损失后所余的有用能量部分与所耗用的总能量之比称为效率,效率主要有以下几种。

锅炉效率:是指锅炉在工作过程中,蒸汽和水所吸收的全部热量,和输入炉内的总热量的比值。一般煤粉炉的效率在 90% 左右。

汽轮机相对内效率:是指汽轮机实际输出的功率与汽轮机理想功率的比值。它考虑了汽轮机所有内部损失,所以它是表明汽轮机内部工作完善程度的指标。一般汽轮机的相对内效率为 70~88%。

发电厂效率:发电厂发出的电能和输入锅炉总热能之比是发电厂效率。也就是扣除锅炉、汽轮机、发电机各项损失之后的有用能量和输入能量之比。一般火力发电厂的效率约为 25~40%,蒸汽参数越高,机组容量越大则效率越高。这是目前火电建设中采用大容量高参数设备的重要原因。

第二节 火力发电厂热力学基础

研究的对象、任务和方法

火力发电厂热力学基础研究的对象是:热能转变成机械能的规律和方法,从而找出提高转换效率的途径。

火力发电厂热力学基础的任务是:研究参与能量转换的工质——气体或水蒸汽的热力性质,和这些转换过程的客观规律,以便使能量的转换过程在最有利的情况下进行,提高发电厂的经济性。

动力资源的经济利用，是我国国民经济中的一个重要原则。对于我们从事电力生产的广大革命职工来说，除了掌握电能生产过程的知识外，还应当对“能”的转换规律有一个基本的认识，才能知道如何安全经济地运行、检修和改进现有的设备，使燃料燃烧所放出的热量更有效地被利用，提高热的经济性，为我国的社会主义革命和社会主义建设作出更大的贡献。

“感觉到了的东西，我们不能立刻理解它，只有理解了的东西才更深刻地感觉它。感觉只解决现象问题，理论才解决本质问题。”因此，我们不能只满足于感性认识，还应该认真地学习理论。

火力发电厂热力学基础研究的方法与其它学科一样，是实践——理论——实践。**“理论的基础是实践，又反过来为实践服务。”**热力学就是在生产实践的基础上发展起来而又为生产实践服务的一门理论基础课。热力学中的一些基本定律，是劳动人民在长期生产实践中得到的经验总结。因此，我们在研究分析热力过程中，以这些定律为依据可以得到可靠的结果。当然，我们在对具体事物作分析时，还必须采用正确的抽象、概括、理想化和简化等方法，例如我们将锅炉的炉膛概括为具有一定温度的热源，将锅炉中的烟气和空气作为理想气体来计算，这在以后各章的讨论中会经常碰到，而且也必须逐步掌握这一方法。

在学习热力学基础时，应当用辩证唯物论的观点分析问题，解决问题。将学习到的理论知识，联系生产实际，为电力生产和建设服务。这是我们学习并掌握《热力学基础》的目的，也只有这样才能收到预期的成果。

第一章 基本概念

第一节 分子和分子运动

一切物质都是由不断运动的分子组成的，这是分子运动论最通俗的解释。分子由原子组成，原子又是由一些更小的粒子组成。在热力学中，许多地方要用分子运动论才能解释清楚，例如压力、温度等等，所以我们现在以分子为基本粒子，讨论一些有关的问题。

分子的质量很小，体积也很小，而数量却很多。例如一个氧分子的质量只有 5.31×10^{-23} 克^①，在标准状态^②下 1 厘米³氧气含有 2.7×10^{19} 个氧分子，即二千七百亿亿个分子。这些分子不是挤得很紧，而是互相之间存在一定的空隙。煤油的气味散布在空间，就是由于煤油分子扩散到空气分子空隙中去的缘故；糖能溶解在水中就是糖分子钻到水分子空隙中去了；固体的热胀冷缩就是因为分子间距离改变的结果。可见，无论气体、液体和固体、它们的分子间都有空隙，其中以气体的空隙最大，固体的空隙最小。

分子之间除存在空隙以外，还存在一种引力。物质内无数分子所以能结合在一起，就是因为分子之间存在着引力的缘故。液体和固体很难压缩，说明分子之间同时又有斥力。分子间的引力和斥力统称为分子力，对外呈现出来的是它们的

① 指数的意义如下： $10^{-1}=0.1$ ， $10^{-2}=0.01$ ， $10^{-3}=0.001$ ，而 $10^1=10$ ， $10^2=100$ ， $10^3=1000$ 。以此类推。

② 标准状态是指大气温度为 0°C 和大气压力为 760 毫米汞柱时的状态。