



# 火力发电厂热力学基础

(修 订 版)

刘美德 楼重义

水利电力出版社

# 火力发电厂 热力学基础

(修订版)

刘美德 楼重义

水利电力出版社

# **火力发电厂热力学基础**

**(修订版)**

**刘美德 楼重义**

\*

**水利电力出版社出版、发行**

**(北京三里河路6号)**

**各地新华书店经售**

**水利电力出版社印刷厂印刷**

\*

**850×1168毫米 32开本 13.875印张 367千字 2插页**

**1976年11月第一版**

**1988年5月第二版 1988年5月北京第三次印刷**

**印数42411—48060册 定价 3.95元**

**ISBN 7-120-00039-X/TK·19**

## 内 容 提 要

本书为《火力发电厂热力学基础》的修订版。原书密切结合发电厂的实际，通俗地有层次地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的效率的方法。修订版除保留原书的这一特色外，对原书的内容作了适当的加强，增加了三相点、马赫数、多变过程、等效卡诺循环以及能量品质分析等方面的内容，此外还增加了传热基本知识一章。

本书供发电厂热机工人和其他工业部门热机专业工人阅读，也可作为青年工人自学热力学课程的参考书。

# 前 言

本书是为火力发电厂的热机工人而编写的工人自学丛书之一。自1976年出版以来受到广大读者的欢迎，1980年为满足读者需要又重印一次。十年来他们对本书提出了不少宝贵的意见和建议。为了满足读者的要求，我们现在在1980年版本的基础上对本书进行了修订。

本书在修订中保持了原有工人丛书的特色，内容上注意理论联系实际，文字叙述上力求通俗易懂，便于读者自学。同时，在原有内容的基础上，对各章节的深度和广度都有所加强；对原书中过于简略的地方进行了必要的补充和改进；增添了物理量的单位制、三相点、马赫数、多变过程、等效卡诺循环以及关于能量品质的分析等方面的内容。各章节内容的叙述在原有定性分析的基础上加强了定量分析。此外还应读者要求增加了第十三章“传热的基本知识”。

为了帮助读者复习掌握所学的知识，培养解决问题和分析问题的能力，对原书中的例题、思考题及习题均做了必要的补充，并在书后附习题解。

本书重点讨论火力发电厂热能转化为机械能的规律和方法，并分析提高转化效率的途径。书中对基本概念、基本定律、过程计算、循环分析等主要内容都作了较详细的论述，尽量帮助读者较容易地掌握这些内容的基本原理及相互关系。对联系工程实际、提高设备热效率、提高经济性，从而节约能源的这类问题也讨论得比较详细。

全书采用了法定计量单位，并附有各种单位的换算公式。

全书由清华大学工程物理系赵兆颐同志主审，由刘美德定

稿。由于编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

编 者

1986.11于北京

# 目 录

## 前 言

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 概 述                     | 1  |
| 第一节 热能的利用及其在电力工业中的地位和作用 | 1  |
| 第二节 火力发电厂的电能生产过程        | 3  |
| 第三节 发电厂的容量、参数、效率        | 8  |
| 第四节 发电厂热力学基础研究的对象及主要内容  | 10 |
| 第一章 基本概念                | 11 |
| 第一节 分子与分子运动论            | 11 |
| 第二节 物理量的单位制             | 13 |
| 第三节 功与功率                | 15 |
| 第四节 能                   | 21 |
| 第五节 热量、热容、比热、热平衡方程      | 24 |
| 第六节 能量守恒与转换定律           | 29 |
| 复习思考题                   | 29 |
| 习题                      | 30 |
| 第二章 工质及其基本状态参数          | 31 |
| 第一节 工质、理想气体和实际气体        | 31 |
| 第二节 温度                  | 33 |
| 第三节 压力                  | 38 |
| 第四节 比容和密度               | 52 |
| 复习思考题                   | 53 |
| 习题                      | 54 |
| 第三章 理想气体定律              | 57 |
| 第一节 理想气体压力、温度、比容之间的关系   | 57 |
| 第二节 摩尔和摩尔容积             | 65 |
| 复习思考题                   | 70 |
| 习题                      | 70 |
| 第四章 理想气体的比热             | 72 |
| 第一节 气体比热的基本概念           | 72 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第二节 气体比热的分类 .....           | 75  |
| 第三节 利用比热计算热量 .....          | 78  |
| 复习思考题 .....                 | 88  |
| 习题 .....                    | 88  |
| 第五章 热力学第一定律和理想气体的热力过程 ..... | 90  |
| 第一节 理想过程 and 实际过程 .....     | 90  |
| 第二节 气体的膨胀功和 $p-v$ 图 .....   | 92  |
| 第三节 气体的内能 .....             | 96  |
| 第四节 热力学第一定律 .....           | 98  |
| 第五节 定容过程 .....              | 101 |
| 第六节 定压过程 .....              | 102 |
| 第七节 状态参数——焓 .....           | 104 |
| 第八节 定温过程 .....              | 109 |
| 第九节 绝热过程 .....              | 112 |
| 第十节 多变过程 .....              | 118 |
| 复习思考题 .....                 | 120 |
| 习题 .....                    | 121 |
| 第六章 热力循环及热力学第二定律 .....      | 123 |
| 第一节 热力循环 .....              | 124 |
| 第二节 热力学第二定律 .....           | 129 |
| 第三节 卡诺循环 .....              | 134 |
| 第四节 熵与温熵图 .....             | 138 |
| 第五节 利用温-熵图分析热力过程 .....      | 141 |
| 第六节 利用温-熵图分析热力循环 .....      | 144 |
| 复习思考题 .....                 | 148 |
| 习题 .....                    | 149 |
| 第七章 汽化和凝结 .....             | 151 |
| 第一节 汽化和凝结 .....             | 152 |
| 第二节 汽、液转化和饱和状态 .....        | 157 |
| 第三节 汽化潜热和凝结热 .....          | 161 |
| 复习思考题 .....                 | 165 |
| 习题 .....                    | 166 |
| 第八章 水蒸汽 .....               | 167 |



|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 第一节   | 定压下水蒸汽产生的过程         | 167 |
| 第二节   | 水和水蒸汽热力性质表          | 178 |
| 第三节   | 水和水蒸汽状态参数的确定        | 183 |
| 第四节   | 水蒸汽的焓-熵图 ( $h-s$ 图) | 184 |
| 第五节   | 水蒸汽的基本热力过程          | 189 |
| 复习思考题 |                     | 196 |
| 习题    |                     | 197 |
| 第九章   | 气体和蒸汽的流动            | 199 |
| 第一节   | 基本概念                | 199 |
| 第二节   | 稳定流动的基本方程式          | 201 |
| 第三节   | 喷管和扩压管的作用           | 213 |
| 第四节   | 气体通过喷管时流速和流量的计算     | 215 |
| 第五节   | 临界压力比、临界速度、最大流量     | 218 |
| 第六节   | 渐缩喷管与缩放喷管的计算和选择     | 225 |
| 第七节   | 蒸汽在喷管中的实际流动过程       | 233 |
| 第八节   | 绝热节流及其应用            | 237 |
| 复习思考题 |                     | 244 |
| 习题    |                     | 244 |
| 第十章   | 蒸汽动力装置循环            | 246 |
| 第一节   | 饱和蒸汽的卡诺循环           | 248 |
| 第二节   | 蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环   | 250 |
| 第三节   | 蒸汽参数对循环热效率的影响       | 259 |
| 第四节   | 蒸汽再热循环              | 264 |
| 第五节   | 回热循环                | 270 |
| 第六节   | 热电合供循环              | 277 |
| 第七节   | 蒸汽-燃气联合循环           | 282 |
| 复习思考题 |                     | 286 |
| 习题    |                     | 288 |
| 第十一章  | 混合气体                | 290 |
| 第一节   | 什么是混合气体             | 290 |
| 第二节   | 分压力及道尔顿定律           | 291 |
| 第三节   | 分容积与总容积             | 293 |
| 第四节   | 混合气体的成分表示法          | 294 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 第五节 混合气体的平均相对分子质量及气体常数 .....  | 297        |
| 第六节 分压力的计算 .....              | 299        |
| 第七节 混合气体的比热 .....             | 300        |
| 复习思考题 .....                   | 305        |
| 习题 .....                      | 306        |
| <b>第十二章 湿空气</b> .....         | <b>307</b> |
| 第一节 基本概念 .....                | 307        |
| 第二节 绝对湿度和相对湿度 .....           | 311        |
| 第三节 湿空气的参数 .....              | 316        |
| 第四节 湿空气的焓-湿图 ( $h-d$ 图) ..... | 321        |
| 第五节 冷水塔和干燥器 .....             | 324        |
| 第六节 湿空气对生产及生活的影响 .....        | 328        |
| 复习思考题 .....                   | 330        |
| 习题 .....                      | 331        |
| <b>第十三章 传热的基本知识</b> .....     | <b>332</b> |
| 第一节 热交换的三种基本方式 .....          | 332        |
| 第二节 传热 .....                  | 347        |
| 第三节 换热器 .....                 | 354        |
| 复习思考题 .....                   | 359        |
| 习题 .....                      | 360        |
| <b>附录</b> .....               | <b>361</b> |
| 附表1 气体的平均定压质量比热 .....         | 361        |
| 附表2 气体的平均定容质量比热 .....         | 362        |
| 附表3 气体的平均定压容积比热 .....         | 363        |
| 附表4 气体的平均定容容积比热 .....         | 364        |
| 附表5 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度排列) .....   | 365        |
| 附表6 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力排列) .....   | 368        |
| 附表7 过冷水与过热蒸汽表 .....           | 370        |
| 附表8 压力单位换算表 .....             | 382        |
| 附表9 功、热量和能量单位换算表 .....        | 383        |
| 附表10 功率单位换算表 .....            | 384        |
| <b>习题解答</b> .....             | <b>385</b> |
| 附图1 水蒸汽的焓-熵图 ( $h-s$ 图)       |            |
| 附图2 湿空气的焓-湿图 ( $h-d$ 图)       |            |

# 概 述

## 第一节 热能的利用及其在电力 工业中的地位和作用

人类社会的发展，促使人们不断地开发和利用自然界的各种能源，而人们对于自然界中能源的开发和利用程度，又是社会生产发展水平的一个重要标志。能源供应的严重不足，直接影响整个国民经济的发展。目前我国缺电严重，现有的生产能力不能充分发挥作用，每年约减少数百亿元的工业产值。如何采取有效的办法来解决我国能源紧张问题，是四化建设的当务之急。

所谓能源，是指为人类生产与日常生活提供各种能量和动力的物质资源。

在自然界中，可被利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中，除风能和水能是以机械能的形式（指空气的动能和水的位能）供给人们以外，其余各种能源往往直接以热能的形式或通过最简便的能量转换，将它们变为热能的形式提供给人们。太阳以辐射的方式向地球传送大量的热能；地热可使水加热成为热水或蒸汽以传送热能；煤、石油、天然气等的化学能，往往通过燃烧转换为热能；原子核裂变反应或聚变反应释放出来的能量也是先转变为热能形式的。以上事实说明，人们从自然能源中获得能量，主要形式是热能。因此，热能的研究和利用，对于整个人类的生产与生活有着巨大的意义，热能的利用在电力工业中占有很重要的地位。

热能的利用一般有两种方式：一种是直接把热能作为加热之用，例如：日常生活中的采暖、蒸煮以及许多工业中的加热、干燥等生产过程，这种加热过程广泛应用于造纸、纺织、化工等工

业中：另一种则是间接利用热能的方式，即把热能在热机中转变为机械能，以带动工作机械（蒸汽机、汽动泵等）用作生产上的动力，或者带动发电机发电而转变成为电能，如发电厂、车辆、船舶的动力装置。

机械能和电能是国民经济中技术生产过程的主要动力来源。

随着我国工农业生产的发展，整个国民经济对产生动力的热能的需求量是很大的。我国的“七五计划”中提出：“到1990年，全国一次能源生产总量达到9.91亿吨标准煤，比1985年增加1.5亿吨，平均每年增长3.4%。五年内，全国共节约和少用能源1亿吨标准煤”“1990年，全国发电量达到5500亿度，比1985年增加1427亿度。”

节约和合理使用现有能源以及开发新能源是当前世界各国研究的一个重要课题。

由于电能具有输送、使用方便，又易于转变成其它形式的能量等一系列优点，故它已成为发展现代社会物质文明的重要条件。工农业生产和日常生活所需要的电能都是由发电厂集中进行生产和供应的。电能可由自然界的各种能源转换而得到，其中以应用化石燃料资源和水力资源来发电占主要地位。核能固然是巨大的能源，但由于核能用于发电在我国起步较晚，以致现阶段核能发电在我国还搞不太多；风力发电受到地理环境的很大限制，而且容量较小、又不易控制；至于太阳能发电、地热发电和潮汐发电等，目前的规模都还很小，其应用场所也受客观条件的限制。总之，风能、地热能、太阳能等在我国利用技术上尚未成熟，经济上还没有竞争力，如太阳能发电投资在我国要12万元/千瓦，比火力发电高一百倍。

因此，根据我国的资源条件，发展电力工业，必须从我国的实际出发，认真贯彻执行“水火并举、因地制宜”的能源政策。我国水力资源非常丰富，在有水力资源的地区应尽可能多开发水电，加快水电站的建设。我国煤炭资源也很充足，近期发电必须以烧煤为主，限制使用油和天然气发电，结合煤炭的开发，要建

设一批能起骨干作用的火力发电基地。对于核电站除应积极开展研究工作外，还要在能源供应紧张的个别地区优先予以发展，有重点、有步骤地建设核电站，借以加速核电起步。

火力发电和水力发电各有其特点，在电力工业中它们均占有重要的地位。水力发电不需要消耗燃料，发电成本较低，运行操作比较简单，但水电站工程浩大，投资多、建期长、布局 and 规模受自然条件的限制，其发电能力在枯水季节将大幅度减小；火力发电虽要耗用大量的化石燃料且运输困难、发电成本较高、对环境污染较大、技术管理较为复杂，但却具有投资较少、建期较短，布局 and 规模灵活，可以既供电又供热等许多优点。这就决定了火力发电在绝大多数国家的电力工业中均占有很大的比重。目前全世界的火力发电量约占总发电量的 75% 弱。我国电力工业中，火力发电所占比例也较大，1981 年占 78.8%。在今后的电力建设中火力发电量还会有很大的增长。我国的七五计划中就提出“五年内，电站建设总规模为 6000 万~6500 万千瓦，其中水电 1880 万千瓦；竣工投产发电装机 3000 万~3500 万千瓦，其中水电 800 万千瓦”。由上可知火电的比重是较大的，因此，火力发电仍然是我国电力工业中生产电能的主要方式之一。因此，进一步加快电力工业建设的步伐，提高电力工业的科学技术水平，仍是摆在我们电力工作者面前的一项十分光荣而艰巨的任务。

## 第二节 火力发电厂的 电能生产过程

利用煤、石油和天然气等化石燃料发电的电厂叫火力发电厂，下称发电厂；又发电又供热的发电厂叫热电厂；利用核燃料发电的电厂叫核电厂或核电站；利用核燃料发电又供热的核电站叫核热电站。

发电厂的发动机可采用蒸汽机、汽轮机、内燃机或燃气轮机等。蒸汽机的功率太小，热效率很低；内燃机和燃气轮机都不能直接应用廉价的固体燃料，而且每台机器的容量也受到限制；而

现代结构的汽轮机不仅机组的单机容量可高达 100 万千瓦以上，热效率较高，并且运行稳定、工作可靠。所以，现代大中型发电厂或核电站都使用汽轮机作为原动机。我国的发电厂根据国家电力工业技术政策的规定，以燃煤为主，逐步减少燃烧原油电厂的数量。七五计划期间，压缩烧油 1000 多万吨。1990 年全国烧油量占原油产量的比重，由 1980 年的 40% 下降为 18% 左右。

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发电厂电能的生产过程。

燃用煤粉的发电厂的生产过程是一系列能量转换的过程。经过磨制的煤粉送到锅炉中燃烧。煤粉在炉内燃烧时，它的化学能首先转变为烟气的热能；当烟气沿锅炉炉膛及其后面的烟道流过时，它的热能就逐步传递给在锅炉各部分受热面内流动的水、蒸汽以及空气（在此单纯传热过程中，显然，并未发生能量形式的变化，而只不过是热能从一种介质传递给另一种介质）。锅炉所产生的新蒸汽进入汽轮机后逐级进行膨胀，蒸汽的部分热能就转变为汽流的动能；高速汽流施加作用力于汽轮机的叶片上，推动了叶轮连同整个转子旋转，汽流的动能于是被转换成汽轮机轴上的机械能。汽轮机通过靠背轮（联轴器）带动发电机转动而发出电来，机械能则被转换成电能。

由上述可见，现代发电厂的主要组成部分包括热力和电气两大部分，其中锅炉、汽轮机、发电机为发电厂的三大核心设备，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，它包括汽水循环系统、水处理系统、冷却水系统等，其系统流程图如图 0-1 所示。

锅炉给水先在省煤器 1 中接受烟气的预热，然后引入锅炉顶部汽包的容水空间。锅炉水由于本身的重量沿炉膛外的下降管往下流动，经下联箱进入铺设在炉膛四周的水冷壁 2（上升管），

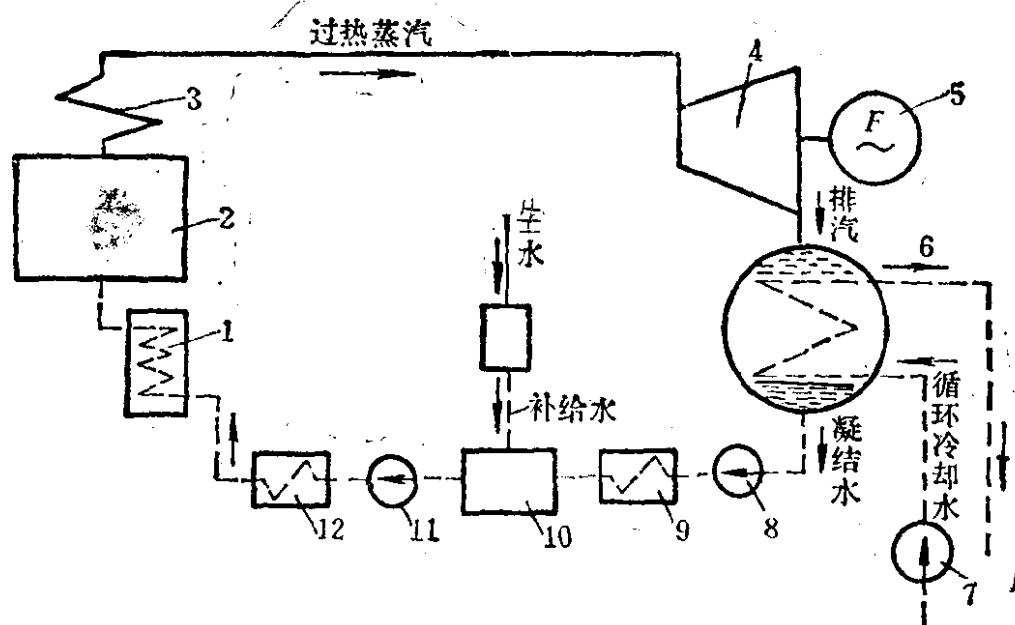


图 0-1 汽水系统流程简图

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—循环水泵；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

在其中吸热汽化，形成的汽水混合物上升到汽包内，并在其中进行汽水分离。水不断在下降管、水冷壁管及汽包内循环、不断汽化，形成的饱和蒸汽聚集在汽包上部并被引入过热器 3 中，使之继续加热变为过热蒸汽。过热蒸汽沿主蒸汽管进入汽轮机 4 中，推动汽轮机转子转动，从而获得机械能。汽轮机带动同一轴上的发电机 5 而发出电来。过热蒸汽在汽轮机内做功后压力温度不断降低，最后变成排汽，排入凝汽器 6 中，并在其中凝结成水（称为主凝结水）。

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，预热后再进入除氧器 10，在其中继续被加热并除去溶解于水中的氧气，以防止氧对炉管的腐蚀。

在除氧器里脱过氧的主凝结水和化学补充水汇集于给水箱中，成为锅炉的给水，由给水泵 11 升压后，经过高压加热器 12 继续提高水温后再打回锅炉，送入锅炉的省煤器，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。

由于锅炉和汽轮机对给水品质的要求很高，而汽水循环过程

中总难免有一部分水和蒸汽的正常消耗和漏泄损失，因而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水处理的水——补给水（高参数大容量的直流锅炉则要求更高，常要求对化学补充水和主凝结水作进一步的深度除盐）。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。

为了使排汽在凝汽器内冷凝成水，还必须借助于循环水泵7对循环（冷却）水加压，使其沿着冷却水进水管进入凝汽器。从凝汽器中出来的具有一定温升的冷却水则沿排水管流回江河里或经冷却后循环使用，这就形成了汽轮机的冷却水系统。

## 二、燃 烧 系 统

燃烧系统包括锅炉的燃烧设备、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。

燃烧系统的流程示意图，如图0-2所示。

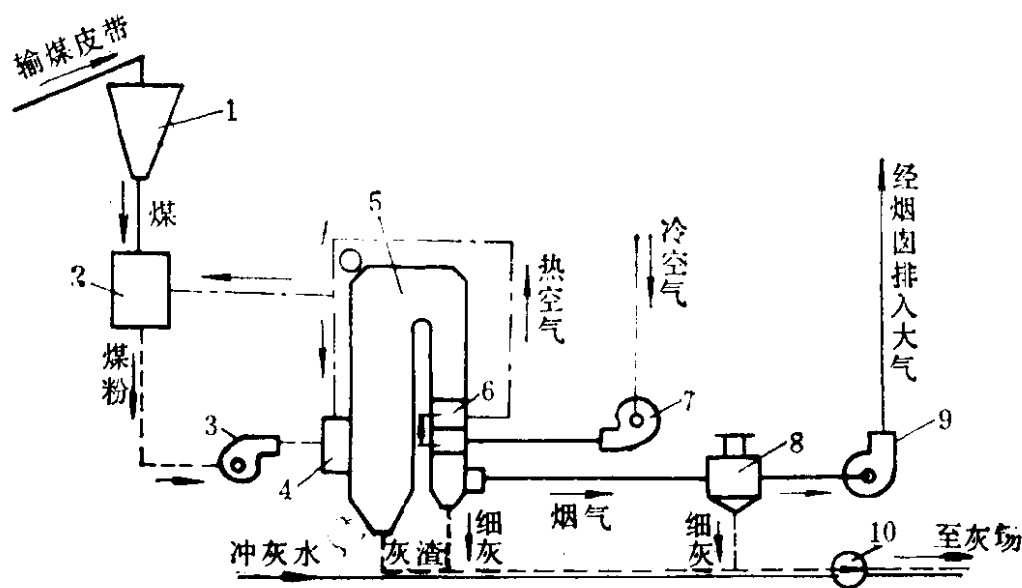


图 0-2 燃烧系统流程示意图

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



发电厂贮煤厂的煤，经过碎煤机设备破碎后，由输煤皮带输送到锅炉房的原煤斗 1 中。煤从原煤斗进入磨煤机 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，然后与经过预热的空气共同通过喷燃器 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。为了物尽其用，目前我国有些发电厂已对灰渣和除尘器所捕集到的飞灰加以利用。前者常被用于筑路，后者则可用来制造建筑材料。

### 三、电 气 系 统

电气系统如图 0-3 所示。

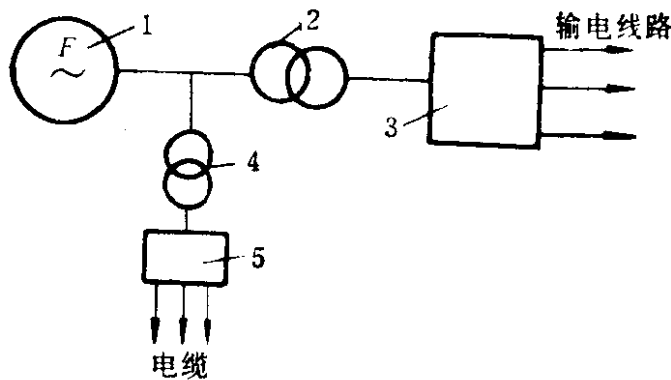


图 0-3 电气系统示意图

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

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。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。

发电厂所发出的电能，不可能全部都供应外界用户，而必须