

高等学校教材

发电厂热力设备

上海交通大学 黄焕椿 编

1.4

水利电力出版社

内 容 提 要

本书内容为发电厂热工理论基础与热力设备。热工理论基础部分主要阐述与电能生产过程有关的热工基本理论知识；热力设备部分则侧重讲述电厂锅炉和汽轮机的典型结构及其运行原理等。

全书共分五章：第一章工程热力学基础；第二章传热学基础；第三章锅炉设备；第四章汽轮机；第五章热力发电厂。书末附录中附有水蒸汽表和Schmidt版双色焓熵图。

本书为“电力系统及其自动化”专业与“发电厂及电力系统”专业《发电厂热力设备》课程的统编教材，亦可供高等学校电力工程类其它专业师生以及有关工程技术人员参考。

高等学校教材
发电厂热力设备
上海交通大学 黄焕椿 编

*

水利电力出版社出版、发行

（北京·明城墙外）

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 13印张 289千字 1插图

1985年1月第一版 1985年1月北京第一次印刷

印数00001—12310册 定价2.30元

书号 15143·5655

前 言

这本教材的前身——《火力发电厂热力设备》讲义，原是编者为满足本校“发电厂及电力系统”（即今“电力系统及其自动化”）专业的教学需要，按照60学时时的要求而编写的。

1982年5月我校接受水利电力部委托为高等学校四年制电力类专业草拟了本门课程的教学大纲(45~55学时)。迨至同年9月间水利电力部在武汉召开了全国高等学校电力工程类、热动力类专业教材编审委员会第一次会议，经《发电厂》教材编审小组充分讨论后通过了这份大纲，正式确定本课程的名称为“发电厂热力设备”，并将学时数酌减至50学时。随后，编者就根据这次教材编审会议所审定的本课程50学时教学大纲（草案）着手进行改编，精简了原讲义中某些较为次要的或属引伸性的内容，使全书更为紧凑，总篇幅大致削减了15%左右。

本书围绕火力发电厂中的能量转换过程，对现代蒸汽动力循环的基本理论，主要热力设备的工作原理、基本构造和一般运行性能，发电厂的热力系统等主要内容作了较为详尽的阐述。在此次改编过程中，本着适当加强热工基础理论、紧密联系发电厂生产实际的基本原则，力求保持本学科的系统性；同时保留了原讲义强调基本概念、内容精炼、文字叙述与公式图表例题习题等密切配合和相互补充的特色；并充分注意使全书内容难点分散、层次清晰，符合由浅入深、循序渐进的认识规律，力图使之便于学生自学和培养他们分析问题、解决问题的能力，以适应祖国四个现代化宏伟建设事业的迫切需要。

本书共分五章、计47节，还编有例题25个，习题57道。各校使用时，对书中某些标有“*”号的内容，可灵活掌握，根据专业性质和学时数等具体情况或有所侧重或决定取舍。有些叙述性的内容则尽可让学生通过自学掌握，而不必全部都在课堂上一一讲授。为了帮助学生巩固所学到的理论知识，培养运用基本理论解决实际问题的能力，本书第一、第二、第五等章均配备了必要的例题，各章章末还附有复习思考题和习题(包括答案)。拟编这些题目时，均尽量注意使之具有针对性和启发性，以期收到举一反三和触类旁通的学习效果。

全书采用国际单位制(SI)，但考虑到当前我国工程界的实际情况，在个别确实有必要的地方(例如对容器内低压力的度量以及锅炉、汽轮机的系列型号等)，不得不保留或并列了工程单位制的数据，以资查对。

本书承蒙全国高等学校电力工程类专业教材编审委员会委托热动力类专业教材编审委员会副主任、南京工学院动力系副主任汪孟乐同志担任主审，在整个编审过程中曾反复多次地得到汪孟乐老师的热情帮助和不厌其烦的耐心指导，致使本书的质量有了基本保证，编者谨以万分感激的心情向他表示由衷的感谢。

本书在一定程度上总结和反映了编者多年来在上海交通大学讲授本门课程所积累起来的某些肤浅体会。但由于编者才疏学浅，复以改编时间极为仓促，虽已尽了很大的努力，

自揣书中疏漏不当甚至谬误之处均在所难免，殷望采用这本教材的各兄弟院校老师和读者批评指正。

黄 焯 椿

1983年冬于上海交通大学

主要符号表

A	功的热当量; 吸收率; 灰分	P_c	临界压力
a	音速; 导温系数	P_b	表压力
B	煤耗量	P_s	饱和压力
b	煤耗率	P_v	真空度; 水蒸汽的分压力
b_n	标准煤耗率	Q	热量; 热流量; 热耗量
C_b	黑体的辐射系数	$Q_{p,u}^H$	燃料的应用基高位发热量
c	质量比热; 流速或绝对速度	$Q_{p,u}^L$	燃料的应用基低位发热量
c'	容积比热	q	热量; 热流密度; 锅炉热损失; 热耗率
c_p	定压质量比热	q_l	每米管长的热流量
c_v	定容质量比热	R	气体常数; 反射率; 热阻
c_m	平均比热	R_m	通用气体常数
D	过热度; 穿透率; 蒸发量; 汽耗量	R_o	传热总热阻
d	直径; 含湿量; 汽耗率	R_T	煤粉细度
d_e	当量直径	R_o	放热热阻
E	辐射力	R_d	导热热阻
E_u	黑体辐射力	Re	雷诺数; 雷诺准则
F	面积或换热面积	r	半径; 容积成分; 汽化潜热
f	截面积	S	总焓
G_r	格拉晓夫准则	s	焓 (比焓)
g	重力加速度; 质量成分	T	热力学温度 (绝对温度)
H	总焓; 湿空气的焓	\bar{T}_1	平均吸热温度
h	焓 (比焓)	\bar{T}_2	平均放热温度
h_{fw}	给水的焓	t	摄氏温度
h_u	过热蒸汽的焓	t_c	临界温度
K	传热系数; 热量利用系数; 厂用电率	t_d	露点温度
K_l	单位管长的传热系数	t_f	流体温度
k	摩尔成分	t_m	平均温度
L	距离或长度	t_b	饱和温度
l	距离或长度	t_w	壁面温度
M	力矩	$\bar{\Delta t}_m$	平均温压
m	质量; 冷却倍率	U	总内能; 润湿周边长度
\dot{m}	质量流量	u	内能; 动叶的轮周速度
Nu	努谢尔特准则	V	容积
n	多变指数; 转速; 回热级数	V_k	实际空气量
P	功率	V^0	理论空气量
P_e	有效功率	V^r	挥发分
P_i	内部功率	v	比容
P_r	普朗特准则	v_c	临界比容
p	绝对压力	W	水分; 发电量
P_b	大气压力; 背压力	w	过程功; 流速或相对速度

ω_i 内部功
 ω_n 循环净功
 ω_t 技术功
 x 湿蒸汽的干度
 y 湿蒸汽的湿度
 Z 高度
 α 对流换热系数(放热系数); 过量空气系数; 喷管射汽角; 抽汽分额
 α'_l 炉膛出口处的过量空气系数
 α_o 总放热系数
 α_r 辐射放热系数
 β 体积膨胀系数; 动叶进汽角或排汽角
 β_c 临界压力比
 γ 重度
 δ 壁厚
 ϵ 黑度; 部分进汽度
 ϵ_n 相当黑度
 κ 绝热指数 (比热比)
 η_b 锅炉效率

η_g 发电机效率
 η_m 机械效率
 η_{sw} 汽轮机的相对有效效率
 η_{oi} 汽轮机的相对内部效率
 η_p 管道效率
 η_{pl} 发电厂的总效率
 η_c 循环热效率
 $\eta_{t(Reg)}$ 回热循环热效率
 $\eta_{t(Reh)}$ 再热循环热效率
 λ 导热系数 (热导率)
 λ_{ins} 热绝缘层材料的导热系数
 μ 分子量; (动力) 粘性系数
 ν (运) 动粘度
 ρ 密度; 反击度
 ρ_s 蒸汽密度; 绝对湿度
 φ 喷管的速度系数; 相对湿度
 ψ 叶片的速度系数
 ω 角速度; 供热电能生产率

目 录

前 言

主要符号表

绪 论	1
§ 0-1 热能利用及其在电力工业中的地位与作用	1
§ 0-2 我国电力工业的发展概貌	1
§ 0-3 现代汽轮机发电厂的组成及其生产过程	3
§ 0-4 本课程的任务与主要内容	5
第一章 工程热力学基础	7
§ 1-1 工程热力学的研究对象与任务	7
§ 1-2 工质及其基本状态参数	7
§ 1-3 理想气体及其状态方程	11
§ 1-4 热力学第一定律	12
§ 1-5 气体的热力过程	19
§ 1-6 稳定流动能量方程式与焓	26
§ 1-7 水蒸汽在定压下的形成过程	30
§ 1-8 水蒸汽的图表及其应用	32
§ 1-9 水蒸汽的典型热力过程	36
§ 1-10 热力学第二定律	41
§ 1-11 朗肯循环	45
*§ 1-12 理想气体混合物	49
复习思考题	55
习题	56
第二章 传热学基础	62
§ 2-1 概述	62
§ 2-2 导热	62
§ 2-3 对流换热	67
§ 2-4 辐射换热	74
§ 2-5 传热与换热器	78
复习思考题	84
习题	85
第三章 锅炉设备	88
§ 3-1 电厂锅炉概述	88
§ 3-2 锅炉燃料及其燃烧	90
§ 3-3 锅炉的热平衡	93
§ 3-4 煤粉炉以及煤粉的制备	95

§ 3-5	锅炉受热面	99
§ 3-6	直流锅炉简述	105
§ 3-7	锅炉的主要辅助设备	106
§ 3-8	典型电厂锅炉及其主要附件	110
§ 3-9	锅炉安全运行的基本知识	114
*§ 3-10	锅炉设备自动调节的概念	116
	复习思考题	118
	习题	119
第四章 汽轮机		121
§ 4-1	汽轮机的一般概念	121
§ 4-2	汽轮机级内的工作过程	121
§ 4-3	多级汽轮机	125
§ 4-4	汽轮机的效率和功率	126
*§ 4-5	汽轮机主要部件的构造	129
§ 4-6	汽轮机本体结构实例	136
§ 4-7	汽轮机的调节系统及保护装置	139
§ 4-8	汽轮机的油系统	143
§ 4-9	汽轮机的主要辅助设备	144
§ 4-10	汽轮机安全运行的基本知识	150
	复习思考题	153
	习题	154
第五章 热力发电厂		156
§ 5-1	热力发电厂概述	156
§ 5-2	再热循环	156
§ 5-3	回热循环	159
§ 5-4	热电联产循环	165
§ 5-5	凝汽式发电厂的各项能量损失	167
§ 5-6	凝汽式发电厂的主要技术经济指标	169
§ 5-7	发电厂的热力系统	173
§ 5-8	发电厂的输煤、除灰和供水系统概述	177
*§ 5-9	热力发电厂的主厂房布置	180
*§ 5-10	原子能发电厂的基本知识	183
	复习思考题	187
	习题	189
附录		
附表 I	饱和水与干饱和蒸汽表 (按压力编排)	191
附表 II	饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度编排)	192
附表 III	未饱和水与过热蒸汽表	193
附图	水蒸汽焓-熵图	

绪 论

§ 0-1 热能利用及其在电力工业中的地位与作用

在自然界中，蕴藏着极为丰富的能量，如风力、水力、燃料化学能、太阳能以及原子（核）能等等。按照物质运动形式之不同，能量可相应地分为：机械能、热能、电能、化学能和辐射能等多种形式。物体在作机械运动时所具有的宏观能量（包括宏观动能及宏观势能）叫做“机械能”，而所谓热能则是指组成物质的所有微粒作各种不规则热运动时的总能量。

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，其中以利用热能（主要由燃料中的化学能通过燃烧转变而来）最为广泛。人们利用热能一般有两种方式：一种是直接把热能用于加热、采暖、蒸煮或烘干等；另一种则是间接利用方式，即把热能转换为发动机转轴上的机械能，用作生产上的动力，或进一步将机械能转变为电能。

由于电能具备输送、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，其中以应用燃料资源和水力资源来发电占主要地位。原子能固然是巨大的能源，但由于原子能用于发电起步较晚，还不到三十年的历史，以致现阶段原子能发电量在全世界总发电量中所占的比重仍然不大；风力发电受到地理环境的很大限制，况且容量较小，又不易控制；至于太阳能发电、地热发电和潮汐发电等，目前它们的规模都还很小，其应用场所亦受客观特定条件的限制。因此，就我国的情况而言，估计在今后相当长的时期内电能主要还是依靠火力（热力）发电厂和水电站来生产与供应。

热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。水力发电毋需消耗燃料，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，布局和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；热力发电要耗用大量燃料，发电成本较高，技术管理较为复杂，但却具有投资较少、建期较短、布局和规模灵活、可以既供电又供热等许多优点。这就决定了热力发电在绝大多数国家的电力工业中均占有很大的比重。目前全世界的热力发电量约占总发电量的75%弱，我国1981年占78.8%。由于在我国电力工业中热力发电所占比例较大，在今后的电力建设中热力发电量必然还会有很大的增长，因此，热力发电仍然是我国电力工业中生产电能的主要方式之一。

§ 0-2 我国电力工业的发展概貌

旧中国的电力工业和其他工业一样，基础薄弱，技术落后，直至1949年解放初期为止，我国发电设备的装机容量总共也不过是1850MW。当时，全国电厂的分布极不合理，设备

陈旧，参数混乱，劳动条件十分恶劣。这些电厂的运行水平很低，加之设备年久失修、事故频繁，其中多数电厂的发电标准煤耗率（即发一度电所消耗的标准煤数量）竟高达1200 g/(kW·h)以上，其经济效益之低自不待言。所有这些电厂，非但主要设备必须由某些资本主义国家提供，甚至连基建、运行、检修中所用的材料和设备配件也都依赖进口。那时，我们国家还根本不能制造汽轮机，至于锅炉则仅能制造蒸发量（即锅炉每小时所生产的蒸汽量）不超过3 t/h、压力低于0.6MPa的小型锅炉。

解放后，我国人民在中国共产党的正确领导下，认真贯彻了自力更生、奋发图强、艰苦奋斗、勤俭建国的方针，使我国的电力工业得到了前所未有的巨大发展。我国社会主义制度的优越性在电力工业方面确是得到了充分的体现。到1981年止，我国发电设备的总装机容量，已由1949年的1850 MW增加到63360 MW，增长了33.2倍；全年发电量则由1949年的43亿度（占世界第25位）上升到3093亿度（占世界第6位），增长了70.9倍。1980年的统计资料表明：我国高温高压机组已占火力发电机组总容量的68%，而这一年全国火力发电厂的平均供电煤耗降低为448 g/(kW·h)。显然，我国电力工业如此之高的发展速度是任何资本主义国家所望尘莫及的。

随着电力工业的不断发展，目前我国已能自行设计和制造蒸发量为1000 t/h的亚临界压力锅炉以及300MW的大型汽轮发电机组，并已着手研制600MW以上的机组，对容量超过1000MW的大型火力发电厂亦能全部自行设计和安装，而且在全国范围内已经建成了一大批超高参数或亚临界参数的现代化发电厂（包括装机容量超过500 MW的24个厂在内，总容量达50000 MW）和许多不同规模的电力网系统（其中系统容量超过1000MW的有13个）。这就在很大程度上改变了我国过去电力工业布局很不合理的情况。尽管如此，我国的电力工业仍然赶不上整个国民经济发展的需要，电力工业的技术水平与一些先进国家相比，也还有一定的差距。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，乃是摆在我国电力工作者面前的一项十分光荣而艰巨的任务。

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，以及电力工业方面的一系列具体的技术政策。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。我国煤炭资源亦很充足，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，今后则宜多建大型矿区电厂，大力发展中间再热式大容量机组，并注意改进中、小型电厂。对于原子能发电厂除应积极开展研究工作外，还要在能源供应特别紧张的个别地区（例如华东和东北地区）优先予以发展，借以加速核电起步。此外，还应积极研究和发 展超高压交、直流输电技术，逐步实现区域联网；合理发展热电站，实现地区供热；加强环境保护工作，防止发电厂“三废”（指废气、废水和废渣）对环境的污染，并开展这方面的综合利用工作。

全国所有的发电厂都应当努力提高技术水平和管理水平，厉行增产节约，降低发电成本，使电力工业真正发挥“先行”的作用，为早日实现祖国的四个现代化宏伟目标作出应有的贡献。

中国共产党第十二次全国代表大会的胜利召开，给予我们以极大的鼓舞力量。为把我

国到2000年时的发电设备总装机容量增加到现有全国总装机容量的四倍以上，当前我国广大的电力工作者正在满怀信心地为开创电力工业建设的新局面、为切实完成下列各项光荣任务而努力奋斗：(1)开发长江三峡等地的丰富水力资源；(2)在缺能地区加快核电起步，争取到2000年能建成十座以上容量各达1000MW的核电站；(3)加快我国内蒙古地区露天煤矿的建设和开采，就近建造一批大型矿区电厂；(4)在全国范围内有计划地建设一大批采用亚临界参数、大容量再热式机组的现代化大型火力发电厂。

§ 0-3 现代汽轮机发电厂的组成及其生产过程

热力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，热效率甚低；内燃机和燃气轮机都不能直接应用廉价的固体燃料，况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1000MW以上、热效率较高，并且运行稳定、工作可靠。所以，现代中、大型热力发电厂都是汽轮机发电厂。今后，本书所提及的“热力发电厂”或“火力发电厂”一概是指汽轮机发电厂而言。我国的热力发电厂根据国家电力工业技术政策的规定，以燃煤为主。

图0-1为一座燃用煤粉的小型汽轮机发电厂的生产过程示意图。用火车或轮船运入发电厂贮煤场的煤，经过碎煤设备破碎后，由皮带输送机送入锅炉房内的原煤仓。煤从原煤仓落入给煤机，由给煤机送入磨煤机，在其中研制成煤粉，同时送入热空气来干燥和输送煤粉。磨制好的煤粉，经粗粉分离器除去部分不合格的粗粉后进入旋风分离器，在其中空气和煤粉得以分离，分离出来的细粉进入煤粉仓。煤粉由给粉机送入输粉管，而旋风分离器中的空气则由排粉机抽出。煤粉和空气在输粉管内混合后，由喷燃器喷入炉膛内进行燃烧(也有直接把气粉混合物送入炉内燃烧的，参见§3-4)。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，以减小排烟热量损失，并提高空气温度，改善燃烧过程。炉膛内的燃烧产物——高温烟气，在引风机的拔风作用下，沿着锅炉本体倒U形烟道依次流过炉膛、过热器、省煤器(给水预热设备)和空气预热器，将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气流入除尘器进行净化，净化除尘后的烟气则被引风机抽出，最后经烟囱排入大气。

燃料燃烧时从炉膛内落下的灰渣，从尾部烟道里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、灰渣管等设备将其排送到贮灰场。为了物尽其用，目前我国有些电厂已将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。

锅炉给水先在省煤器中接受烟气的预热，然后引入锅炉顶部汽包(汽鼓)的容水空间内。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管(上升管)，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；将其引入过热器，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，推动汽轮机“转子”转动，从而获得机械能。作功后的乏汽排入凝汽器，并在其中冷却凝

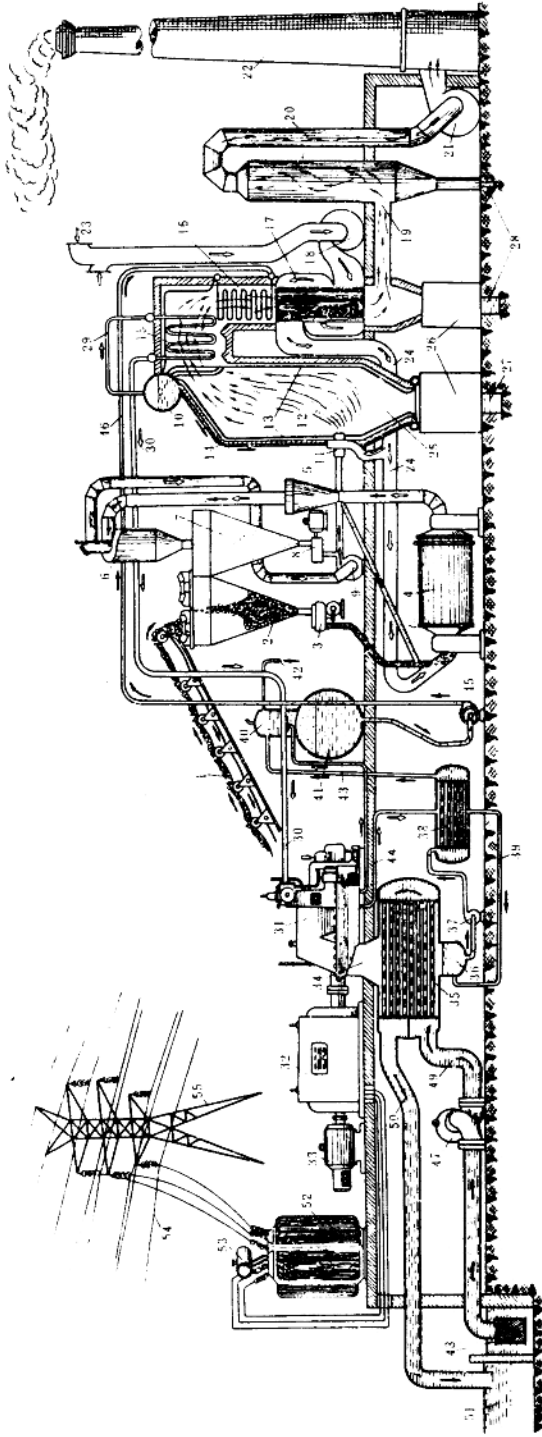


图 0 1 凝汽式发电厂的生产过程示意图

- 1—运煤皮带；2—原煤仓；3—圆锥给煤机；4—钢球磨煤机；5—粗粉分离器；6—旋风分离器；7—省煤器；8—给粉机；9—排粉机；10—汽包；11—燃烧器；12—炉膛；13—水冷壁(上升管)；14—下降管；15—过热器；16—省煤器；17—空气预热器；18—送风机；19—除尘器；20—烟道；21—引风机；22—烟囱；23—送风机的吸风口；24—热风道；25—冷灰斗；26—除尘设备；27—冲灰沟；28—冲灰器；29—抱和蒸汽管；30—主蒸汽管；31—汽轮机；32—发电机；33—励磁机；34—乏汽口；35—凝汽器；36—热井；37—凝结水泵；38—低压回热加热器；39—低加疏水管；40—除氧器；41—给水箱；42—化学补充水入口；43—汽轮机第一级抽汽；44—汽轮机第二级抽汽；45—给水泵；46—给水管；47—循环水泵；48—暖水塔；49—暖水进水管；50—冷却水出水管；51—江河或冷却水池；52—主变压器；53—油枕；54—高压输电线路；55—铁塔

结成水(称为主凝结水)。

汇集在凝汽器热井中的主凝结水,用凝结水泵打入回热加热器,预热后再进入除氧器,在其中继续被加热并除去溶解于水中的氧气,以防止氧对金属的腐蚀作用。

从汽轮机某几个中间级后引出来的抽汽,分别供给除氧器和回热加热器等作为加热除氧以及预热给水之用,而预热给水可以提高发电厂对热能利用的经济性。

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,借给水泵升压后,沿给水管路(大型电厂还设有高压给水回热加热器)送入锅炉的省煤器,以便继续使用。

由于锅炉和汽轮机对给水品质的要求都很高,而汽水循环过程中总是难免有一部分水和蒸汽的正常消耗和漏泄损失,故一般中、小型锅炉都要求使用经化学水处理设备处理过的高质量软化水作为补给水进行补充(至于高参数、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)。

为使乏汽在凝汽器内冷凝成水,还必须借助于循环水泵对冷却水(又称“循环水”)加压,并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路流回江河里,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机械的厂用电源,其余大部分电能均经主变压器升高电压后送入电网。

从能量转换的角度来看,各热力发电厂的生产过程本质上都是一样的。因为它们的能量转换都是由燃料的燃烧开始,燃料在炉内燃烧时,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(在此单纯传热的过程中,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,机械能则被转换成发电厂的产品——交流电。

由上述可见,现代热力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。

热力发电厂是一个大型的工业企业,它由一系列热力设备和电气设备构成一个有机的整体。为了便于组织生产和进行管理,大型热力发电厂一般都设有燃料、锅炉、汽机、电气、化学、热工等车间(亦称分场)。

§ 0-4 本课程的任务与主要内容

如上所述,热力发电厂是由许多热力设备和电气设备所组成的一个非常复杂的整体,从某种意义上讲,热力部分的设备更多、更为复杂,也更容易发生故障和事故,热力部分和电气部分彼此间的关系是十分密切的。因此,凡从事电力工程方面工作的技术人员,都

必须对有关热力部分的某些基本知识有所了解，有所掌握。《发电厂热力设备》是“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”等专业的一门对热工理论基础要求较高的专业课。本课程的任务就在于研究和讨论：热力发电厂中能量逐次转换的过程，热力部分的组成，主要热力设备（锅炉和汽轮机）及其有关辅助设备的基本原理、构造特点以及重要性能等。通过本门课程的学习，要求学生能较全面地认识热力发电厂生产过程的各个主要环节，较好地了解发电厂主要热力设备的工作原理、基本构造和一般运行知识，并通过参观和生产实习等教学环节，对现代的中型和大型热力发电厂逐步建立起较为完整的概念。

为了达到以上要求，本课程的基本内容应当包括热工理论基础（工程热力学和传热学）、锅炉设备、汽轮机以及热力发电厂等部分。鉴于本课程的内容是和发电厂生产实际密切相联系的，所以，对本门课程的学习，除了应当十分重视基本理论和基本知识的掌握外，还必须充分注意理论结合实际。

第一章 工程热力学基础

§ 1-1 工程热力学的研究对象与任务

热力学是研究热现象规律的学科。工程热力学是热力学的一个分支，它主要研究热能与机械能之间相互转换时的量与质的关系，着重研究热能转变为机械能的基本规律，并寻求进行这种转换的最有利的条件。

现代热力工程中所普遍采用的汽轮机、内燃机、燃气轮机以及喷气发动机等，都是将热能转变为机械能的机械设备。通常把这一类机械设备称为热力发动机或简称为热机。从事动力工程方面工作的技术人员必须掌握由热变功的最有利条件。工程热力学的任务就在于研究参与由热变功的某些气态物质的热力性质、热变功过程的基本规律，以及如何有效地提高热变功过程的经济性等。

由此可见，工程热力学为人们正确了解热力发电厂中的能量转换过程，正确理解发电厂中主要热力设备的工作原理及其运行性能等提供了必需的基础理论知识。

工程热力学是从工程实用观点出发，主要以宏观研究方法研究气态物质的吸热、做功等宏观规律，对微观现象的物理本质一般不作深入讨论。

§ 1-2 工质及其基本状态参数

热能总是依附于物质而存在的。在任何热机中，欲使热变功过程付诸实现，就必须借助于某种媒介物质，即依靠它的状态交替地进行变化——加热、放热、膨胀和压缩，才有可能连续不断地使热能转变为功。这种参与热功转换的媒介物质，称为“工质”。工质的热力性质与作功能力的大小有着十分密切的关系。最适宜于作为热机工质的是气态物质，因为气态物质在受热之后具有最大的膨胀作功能力，而且它们的流动性能和压缩性能都比较好。在现代热力发电厂的发动机中，绝大多数都采用水蒸汽作为工质。

热机中能量的转换是依靠工质的状态发生变化来完成的。描述工质在某一给定瞬间的物理特性的各个宏观物理量，称为状态参数。对于工质的每一个状态，其状态参数都有确定的数值。当任意两个独立的状态参数确定时，工质的状态即被确定。物质或物质系统的状态参数很多，其中仅温度、压力、比容这三个参数既便于测量，又具有比较容易理解的物理意义，因此，通常把它们叫做工质的“基本状态参数”。

一、温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。在工程热力学的计算中往往要采用热力学温度。热力学温度（即绝对温度）是根据热力学原理定义的。在国际单位制(SI)中，热力学温度是7个基本单位量之一，用符号 T 表示，单位名称是开[尔文]，符号为K。按照国际单位制的规定，水的三相点为273.16K，因此1开尔文等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

与热力学温度并用的还有摄氏温度，用符号 t 表示，单位名称是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏度是表示摄氏温度时用来代替开尔文的一个专门名称。摄氏温度被定义为

$$t = T - T_0 \quad (1.1)$$

式中 $T_0 = 273.15\text{K}$ 。在一般的工程计算中，取 $T_0 = 273\text{K}$ 已足够准确。摄氏温度与热力学温度之间，每一度的间隔大小完全相同，只是所取的零度不同罢了。

测量温度的仪表称为温度计。工程上所用的温度计种类繁多。使用最广泛的温度计是水银玻璃杆温度计，它是利用水银的受热膨胀原理来测量温度的。工程上另一种常用的温度计是热电偶温度计，其所依据的原理是热电偶的热电现象。将两种不同材料的金属丝端部焊接起来就构成一个热电偶。当两端接点温度不同时（温度高的一端称为热端，低的一端则称为冷端），热电偶回路中就有一个大小正比于热、冷两端温度差的电动势（又称热电势）产生，可用毫伏计或电位差计测量热电势。如使冷端温度保持 0°C ，那末就可从上述测量仪表上直接读出热端温度的数值。此外，还有电阻温度计以及用于测量高温的辐射温度计和光学高温计等。

二、压力

工质的压力是其大量分子对容器壁面频繁撞击的平均结果，它是以单位面积上所承受的垂直力来度量的，在物理学中亦称之为“压强”。

1. 压力单位

在国际单位制中，压力的基本单位为 N/m^2 （即 1 平方米面积上作用 1 牛顿力），称为帕斯卡 (Pascal) 或简称帕，用符号 Pa 表示。但实用中常嫌“帕”太小，故工程上压力也常用兆帕 (MPa) 作单位， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

目前我国工程界的实际情况，暂与国际制并用的压力单位还有：

(1) 单位液柱高度 (mmHg 或 mmH_2O)：当工质的压力较低时，常用单位液柱高度（例如毫米汞柱或毫米水柱）作为压力单位。它等于单位高度的液柱以其本身的重量作用于底面积上所产生的压力。此时的压力数值可按以下公式换算成帕：

$$p = h\gamma = h\rho g \quad (1.2)$$

式中 h ——液柱高度 (m)；

γ ——液体的重度 (N/m^3)；

ρ ——液体的密度 (kg/m^3)；

g ——重力加速度 (m/s^2)。

因水的重度为 $9.8067 \times 10^3 \text{N}/\text{m}^3$ (4°C 时)，汞的重度为 $1.33321 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^3$ (0°C 时)，故得 $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8067\text{Pa}$ ； $1\text{mmHg} = 133.321\text{Pa}$ 。

(2) 工程大气压 (at) 或千克力/厘米² (kgf/cm^2)：

$$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 98067\text{Pa} = 0.09807\text{MPa}$$

(3) 物理大气压 (atm)：纬度 45° 海平面上的常年平均大气压力叫做 1 物理大气压或 1 标准大气压 (atm)，其值为 760mmHg (0°C)。

$1/T_0$ 代表水的冰点热力学温度，它比水的三相点热力学温度低 0.01K 。

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} \approx 0.1013 \text{ MPa}$$

热力工程中以采用何种压力单位为好,应根据实际需要来决定。例如,电厂锅炉中的蒸汽压力一般都很高,常用多少MPa或at来表示;汽轮机凝汽器内的乏汽压力和锅炉送风机、引风机所维持的压差通常均较低,因此可用kPa或mmH₂O来表示,at、mmH₂O将不用。

2. 压力测量

流体的压力可用弹簧管压力表或U形管压力表测量。工程上以弹簧管压力表使用最为广泛,而U形管压力表仅适用于测量较低的压力。两者实际上都是测量压差的仪器。

弹簧管压力表的基本结构如图 1-1 所示。它是利用弹簧管在内外压力差作用下产生变形,引起活动端产生微小位移,此位移通过传动机构拨动指针转动,从而显示压力读数。

U形管压力表如图 1-2 所示。其主要部件为一U形玻璃管,管内盛有工作液体,例如汞或水。由于U形管的两端分别与欲测压力的容器和大气相通,因此可借其两边液柱的高度差来表示容器内实际压力与外界大气压力的差值。当容器内气体的实际压力较大气压力高时(图 1-2, a),这高出的部分称为“表压力”,用 p_g 表示,容器内气体的实际压力称为“绝对压力”,用 p 表示,则

$$p = p_g + p_b \quad (1.3)$$

式中, p_b 代表当地的大气压力,其值随所在地的纬度、海拔高度以及气候情况等条件而变化,可用气压计测定之。

当容器内气体的实际压力较大气压力为低时(图 1-2, b),这低下去的部分称为“真空度”或“负压”,用 p_v 表示,则

$$p = p_b - p_v \quad (1.4)$$

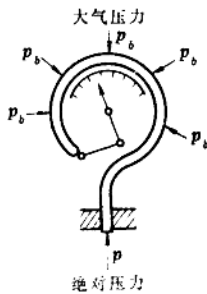


图 1-1 弹簧管压力表

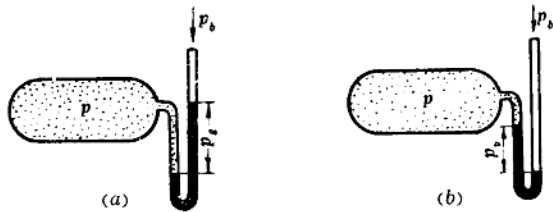


图 1-2 U形管压力表

(a) $p > p_b$; (b) $p < p_b$

图 1-3 示出了上述各种压力之间的相互关系。

应当指出,大气压力随时间和地点不同而改变。因此,在一定的绝对压力下,由于大气压力的不同,表压力或真空度则有不同的数值。这就说明了,只有绝对压力 p 才能真正反映气态工质的热力学状态。所以,在热力学中都以工质的绝对压力作为状态参数,而一切热工计算亦均以绝对压力作为计算的依据。但绝对压力通常是很难直接测量的,一般都通过 p_g (或 p_v)和 p_b 等数据按以上公式间接算得。

在工程计算中,当容器内工质的压力很高时,通常可把当地大气压力 p_b 近似地当作等于0.1MPa,这样处理所引起的误差实际上是微不足道的。但必须注意,在计算较低的压力