

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热工基础

宋长华 主编

REGONG JICHU

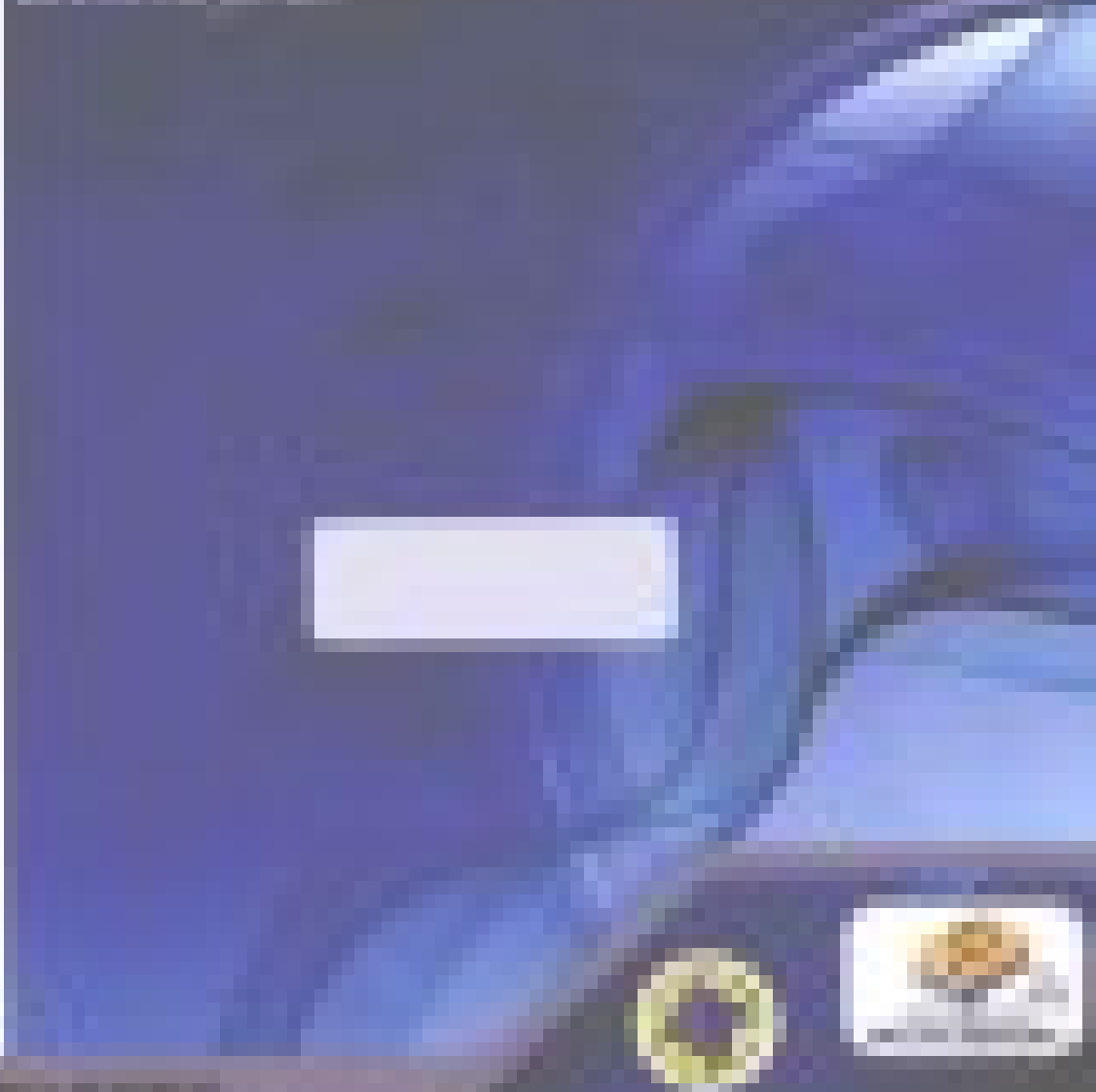


中国工程教育认证标准下的教材建设

热工基础

第2版

中国工程教育认证标准下的教材建设



高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

热 工 基 础

主 编 宋长华
副主编 詹黔平 陈明付 舒玉萍
参 编 张友利 余长开
主 审 李隆键



机 械 工 业 出 版 社

本书为高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材。

全书分为两篇,共11章。第一篇为工程热力学,包括热力学基本概念、热力学第一定律及其应用、理想气体及其热力过程、热力学第二定律、水蒸气、气体和蒸汽的流动、蒸汽动力装置循环;第二篇为传热学,包括导热、对流换热、热辐射及辐射换热、传热过程与换热器。为便于教学与学生学习,每章编排了学习目标、小结、自测练习题。

本书可作为高职高专院校电厂热能动力装置、火电厂集控运行、热工检测与控制技术等专业的教材,也可作为火电厂热动类运行与维护人员岗位培训和技能鉴定的培训教材,还可作为相关技术人员和相关专业学生的参考书。

本书作为重庆市市级精品课程和精品资源共享课程配套教材,配有丰富的配套资源,详见精品课程网址:<http://rgjc.jpkc.cqepc.com.cn/>。为方便教学,本书配有电子课件、自测练习题参考答案、模拟试卷等,凡选用本书作为教材的学校,均可来电免费索取。咨询电话:010-88379758; E-mail: wangzongf@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础/宋长华主编. —北京:机械工业出版社,2013.8

高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材

ISBN 978-7-111-43038-4

I. ①热… II. ①宋… III. ①热工学 - 高等职业教育 - 教材
IV. ①TK122

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第136277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:王宗锋 责任编辑:王宗锋 曲世海

版式设计:常天培 责任校对:张媛

责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2013年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20印张·1插页·496千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43038-4

定价:38.00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

本书作为高职高专“十二五”电力技术类专业规划教材，它是总结重庆市精品课程——“电厂热工基础”课程教学实践的基础上，以高素质技能型专门人才的培养目标为出发点，按照相关专业人才培养方案和“热工基础”课程教学标准要求编写。

“热工基础”是一门重要的专业技术基础课，学好这门课将为学习后续专业课及其在专业中的应用打下良好的基础。本书编写中坚持基本知识够用为度、注重理论的实际应用，同时也遵循学生的认知规律。因此，编写本书的指导思想是：确保基础、精选内容、突出重点、注重应用、便于教学和自学。

本书在内容和体例上力图体现以下特点：

1. 精选教材内容。按照专业人才培养方案和课程教学标准要求，并结合高职高专教学的特点精选教材内容、注重工学结合。如简化了理想气体的热力过程、热力学第二定律、对流换热和辐射换热等部分的公式推导，只强调结果的应用；同时考虑到其他相关专业和当前电力生产技术发展状况，增加了能源相关概念、核能发电厂循环、燃气-蒸汽联合循环等内容。由于本课程是学生最先接触的专业技术基础课程，在绪论部分增加了电力工业的发展概况，较详细地介绍了火力发电厂的生产过程和主要热力设备，便于学生理解本课程涉及的相关内容，提高学生对专业的认识和学习兴趣。

2. 易于教和学的编排结构。各章前面提出“学习目标”，章后有“小结”和“自测练习题”，有助于学生把握学习重点，复习和巩固本章基本知识。各种题型的“自测练习题”有600多题，还提供了参考答案，这是目前最受高职高专学生欢迎的，通过这些题的练习，学生能够检验自己的学习状况，从而激发学生的学习兴趣 and 积极性。

3. 图表的应用。由于图、表的直观性强，学生也易于接受，教材中尽量使用图、表来说明和归纳总结所学知识。

4. 企业人员参加编写及指导。在内容和例题选择上，尽量结合火电厂生产实际叙述和举例。

5. 配套教学资源丰富。同时，本书作为重庆市市级精品课程和精品资源共享课程的配套教材，课程网站中包括教学录像、教学课件、动画、电子教案、自测练习、模拟试题库等资源。

本书由重庆电力高等专科学校宋长华任主编，贵州电力职业技术学院詹黔平、舒玉萍及福建电力职业技术学院陈明付任副主编，参加本书编写的还有重庆电力高等专科学校张友利、华能重庆珞璜发电厂余长开。宋长华负责统稿，并编写绪论、第1~3章，张友利编写第4章，陈明付编写第5~7章，余长开参加编写了第7章及附录，詹黔平和舒玉萍编写第8~11章。

本书由重庆大学李隆键教授担任主审，他对本书进行了认真审阅，提出了许多宝贵的意见和建议。同时，在本书编写过程中，华能重庆珞璜电厂、重庆发电厂、国电重庆恒泰发电厂有关技术人员对本书也提出了一些有益的建议，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
【学习目标】	1
0.1 能量、能源和热能的利用	1
0.2 火力发电厂的生产过程	4
0.3 “热工基础”课程的主要内容及其 在专业中的作用	7
小结	9
自测练习题	9
第一篇 工程热力学	10
第1章 热力学基本概念	10
【学习目标】	10
1.1 热力系及类型	10
1.1.1 热力系、外界和边界	10
1.1.2 热力系的类型	11
1.2 平衡状态及基本状态参数	13
1.2.1 工质的状态与状态参数	13
1.2.2 基本状态参数	14
1.2.3 状态方程和状态参数坐标图	18
1.3 热力过程	19
1.3.1 准平衡过程	20
1.3.2 可逆过程	20
1.4 功与热量	22
1.4.1 功	22
1.4.2 热量	24
1.5 热力循环	26
1.5.1 热力循环及其类型	26
1.5.2 正向循环及其热效率	27
1.5.3 逆向循环及其性能系数	28
小结	29
自测练习题	30
第2章 热力学第一定律及其应用	34
【学习目标】	34
2.1 热力系的储存能与热力学能	34
2.1.1 热力学能	34
2.1.2 外部储存能	35
2.1.3 热力系的总储存能	35
2.2 热力学第一定律的实质及表述	36
2.3 闭口系能量方程式	36
2.4 开口系的稳定流动能量方程式和焓	39
2.4.1 稳定流动和推动功	39
2.4.2 稳定流动能量方程式	41
2.4.3 焓和技术功	42
2.5 稳定流动能量方程的应用	45
2.5.1 换热设备	45
2.5.2 热力发动机	45
2.5.3 泵与风机	46
2.5.4 喷管与扩压管	46
小结	47
自测练习题	49
第3章 理想气体及其热力过程	53
【学习目标】	53
3.1 理想气体状态方程式	53
3.1.1 理想气体与实际气体	53
3.1.2 理想气体状态方程式及其应用	54
3.2 理想气体的比热容	56
3.2.1 比热容的定义及分类	56
3.2.2 比定容热容和比定压热容	57
3.2.3 真实比热容、平均比热容与定值 比热容	59
3.3 理想气体的热力学能、焓和熵变化量 的计算	62
3.3.1 理想气体的热力学能、焓变化量 的计算	62
3.3.2 理想气体的熵变化量的计算	63
3.4 理想混合气体的性质	64
3.4.1 混合气体的基本状态参数及基本 定律	64
3.4.2 混合气体的成分表示方法	65
3.4.3 混合气体的平均千摩尔质量与 平均气体常数	66
3.4.4 混合气体分压力的确定	67
3.4.5 混合气体的比热容	67
3.5 理想气体的基本热力过程	68
3.5.1 定容过程	69
3.5.2 定压过程	70
3.5.3 定温过程	71
3.5.4 绝热过程	72
3.5.5 多变过程	74
小结	75

自测练习题	77	5.5 水蒸气的典型热力过程	112
第4章 热力学第二定律	82	5.5.1 定压过程	113
【学习目标】	82	5.5.2 可逆绝热过程(定熵过程)	113
4.1 热力学第二定律的实质和表述	82	5.6 湿空气的性质	115
4.1.1 自发过程的特性	82	5.6.1 干空气和湿空气	115
4.1.2 热力学第二定律的表述	83	5.6.2 湿空气的状态及状态参数	115
4.1.3 过程方向性与能量品质变化的 关系	84	5.6.3 湿空气应用实例	118
4.2 卡诺循环与卡诺定理	85	小结	119
4.2.1 卡诺循环	85	自测练习题	120
4.2.2 卡诺定理	86	第6章 气体和蒸汽的流动	123
4.2.3 等效卡诺循环	86	【学习目标】	123
4.3 熵与孤立系统熵增原理	89	6.1 一维稳定流动的基本方程式	123
4.3.1 熵的导出	89	6.1.1 连续性方程	123
4.3.2 不可逆过程熵的变化——熵流 和熵产	90	6.1.2 稳定流动的能量方程式	124
4.3.3 孤立系统熵增原理与做功能力 损失	91	6.1.3 过程方程式	124
4.4 烟参数及烟分析方法简介	94	6.1.4 声速与马赫数	124
4.4.1 烟的定义	94	6.2 管内定熵流动的基本特性	125
4.4.2 热量烟	94	6.2.1 流速变化与压力变化间的关系	125
4.4.3 稳定流动工质的烟	94	6.2.2 流速变化与比体积变化间的关 系	126
小结	95	6.2.3 管道截面变化的规律	126
自测练习题	96	6.2.4 临界参数与滞止参数	128
第5章 水蒸气	99	6.3 喷管的计算	129
【学习目标】	99	6.3.1 出口流速计算	129
5.1 水的相变及相图	99	6.3.2 临界压力比及临界流速	130
5.1.1 汽化与凝结	99	6.3.3 喷管的形状选择	130
5.1.2 饱和状态	100	6.3.4 喷管的尺寸计算	131
5.1.3 水的相图($p-T$ 图)	101	6.3.5 喷管内有摩擦阻力的绝热流动	132
5.2 水蒸气的定压产生过程	102	6.4 绝热节流	133
5.2.1 水蒸气定压产生过程的三个阶 段	102	6.4.1 节流过程及其特性	133
5.2.2 水蒸气的 $p-v$ 图与 $T-s$ 图	104	6.4.2 绝热节流的应用	134
5.2.3 高参数水蒸气对电厂锅炉汽水 受热面的影响	106	小结	136
5.3 水蒸气的状态参数和水蒸气表	106	自测练习题	137
5.3.1 焓、熵值零点的规定	106	第7章 蒸汽动力装置循环	141
5.3.2 饱和水与干饱和蒸汽热力性质 表	107	【学习目标】	141
5.3.3 未饱和水与过热蒸汽热力性质 表	108	7.1 朗肯循环	141
5.3.4 水蒸气热力性质表的应用	108	7.1.1 以水蒸气为工质的卡诺循环	141
5.4 水蒸气的 $h-s$ 图	110	7.1.2 朗肯循环的组成	142
5.4.1 水蒸气 $h-s$ 图的构成	110	7.1.3 朗肯循环的热经济指标计算	143
5.4.2 水蒸气 $h-s$ 图的应用	111	7.1.4 有摩擦阻力的实际循环	144
		7.1.5 提高朗肯循环热效率的基本途 径	145
		7.2 再热循环	148
		7.2.1 再热循环的装置系统图和 $T-s$ 图	149
		7.2.2 再热循环的热经济指标计算	149

7.2.3 再热循环分析	150	9.4.2 沸腾换热	218
7.3 回热循环	151	小结	222
7.3.1 回热循环的装置系统图和 $T-s$ 图	152	自测练习题	223
7.3.2 回热循环的热经济性指标计算	152	第 10 章 热辐射及辐射换热	227
7.3.3 回热循环分析	154	【学习目标】	227
7.3.4 同时采用回热和再热的蒸汽动力循环	155	10.1 热辐射的基本概念	227
7.4 热电联产循环	156	10.1.1 热辐射的本质和特征	227
7.5 燃气—蒸汽联合循环简介	158	10.1.2 物体的热辐射特性——吸收、反射和透射	228
7.6 核能发电厂循环	161	10.1.3 辐射力和黑度	231
小结	165	10.2 热辐射的基本定律	232
自测练习题	166	10.2.1 普朗克定律和维恩位移定律	232
第二篇 传热学	170	10.2.2 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	233
第 8 章 导热	170	10.2.3 兰贝特余弦定律	235
【学习目标】	170	10.2.4 实际物体的辐射特性和基尔霍夫定律	235
8.1 传热学概述	170	10.3 物体间辐射换热的计算	237
8.2 导热的基本概念及基本定律	173	10.3.1 辐射角系数	237
8.2.1 基本概念	173	10.3.2 黑体表面之间的辐射换热	240
8.2.2 基本定律	176	10.3.3 灰体表面之间的辐射换热	241
8.2.3 导热系数和保温材料	177	10.3.4 辐射换热的强化与削弱	245
8.3 通过平壁的一维稳态导热	179	10.4 气体辐射和太阳辐射	248
8.3.1 单层平壁导热	179	10.4.1 气体辐射的特点	248
8.3.2 多层平壁导热	181	10.4.2 太阳辐射简介	249
8.4 通过圆筒壁的一维稳态导热	184	小结	250
8.4.1 单层长圆筒壁的一维稳态导热	184	自测练习题	252
8.4.2 多层圆筒壁导热	186	第 11 章 传热过程与换热器	257
8.5 非稳态导热	187	【学习目标】	257
8.5.1 非稳态导热及其类型	187	11.1 换热器及其分类	257
8.5.2 热扩散率 a	189	11.1.1 换热器的类型	257
8.5.3 火电厂非稳态导热实例分析	190	11.1.2 表面式换热器的主要形式	259
小结	191	11.2 传热过程及传热方程式	261
自测练习题	192	11.2.1 传热过程的基本概念	261
第 9 章 对流换热	196	11.2.2 传热方程式	262
【学习目标】	196	11.3 通过平壁和圆筒壁的传热过程	263
9.1 对流换热概述	196	11.3.1 通过平壁的传热过程	263
9.1.1 对流换热的概念	196	11.3.2 通过圆筒壁的传热过程	265
9.1.2 对流换热的计算公式	199	11.4 传热的强化与削弱	267
9.1.3 影响对流换热的因素	199	11.4.1 强化传热	267
9.2 对流换热的研究方法	201	11.4.2 削弱传热	270
9.3 流体无相变的对流换热	203	11.5 表面式换热器的传热计算	273
9.3.1 管内强制对流换热	203	11.5.1 传热计算的基本方程式	273
9.3.2 流体绕流圆管的对流换热	208	11.5.2 平均温差的计算	274
9.3.3 自然对流换热	211	11.5.3 表面式换热器的传热计算方法	277
9.4 流体有相变的对流换热	214	11.6 火电厂典型换热器传热过程分析	281
9.4.1 凝结换热	215		

11.6.1 锅炉各受热面的传热分析	282	附表 7 饱和水与干饱和蒸汽的热力 性质 (按压力排列)	298
11.6.2 汽轮机主要辅助设备的传热 分析	283	附表 8 未饱和水与过热蒸汽的热力性 质	300
小结	284	附表 9 饱和水的热物理性质	307
自测练习题	286	附表 10 标准大气压 ($p_b = 1.01325 \times$ 10^5 Pa) 下过热蒸汽的热物 理性质	308
附录	291	附表 11 标准大气压 ($p_b = 1.01325 \times$ 10^5 Pa) 下干空气的热物理性 质	308
附录 A	291	附表 12 标准大气压 ($p = 1.01325 \times$ 10^5 Pa) 下烟气的热物理性质 ...	309
附表 1 常用单位换算表	291	附表 13 几种油的热物理性质	309
附表 2 气体的平均质量定压热容 $c_p \Big _0^t$	292	附表 14 几种材料的密度、热导率、 比热容和热扩散率	310
附表 3 气体的平均质量定容热容 $c_v \Big _0^t$	293	参考文献	311
附表 4 气体的平均体积定压热容 $c'_p \Big _0^t$	294	附录 B 水蒸汽的焓—熵图	插页
附表 5 气体的平均体积定容热容 $c'_v \Big _0^t$	295		
附表 6 饱和水与干饱和蒸汽的热力 性质 (按温度排列)	296		

绪 论

【学习目标】

- 1) 理解能量、能源、热机、工质和热源的概念。
- 2) 了解热能利用的两种方式 and 火力发电厂的基本生产过程。
- 3) 了解“热工基础”课程研究的主要内容及其在专业中的作用。

0.1 能量、能源和热能的利用

1. 能量和能源

世界是由物质构成的，一切物质都是不断运动着的，运动是物质最基本的属性。能量是物质运动的度量，也是物质的属性；物质的运动形式是多种多样的，对于每一个具体的物质运动形式，必然存在相应的能量形式。随着人类社会的发展，人们对能量的认识和利用水平也不断提高，目前人类所认识的能量主要有：机械能、热能、电能、化学能、原子能及电磁能等多种形式。当物质的运动形式发生转变时，能量的形式也同时发生转变。能量的最基本特征是自然界一切常规过程都遵循能量守恒和转换定律。能量的国际标准单位是焦[耳](J)，有时还用单位时间内的能量（即功率）和时间的乘积来表达，如千瓦·时(kW·h)、马力·时(hp·h)等。

人类在日常生产或生活中需要各种形式的能量，其中应用最广泛的有热能、机械能和电能。热能是指物质分子的热运动（包括移动、转动、振动）动能和由于分子间相互作用力而具有的位能，即不涉及化学变化和原子核反应时的热力学能，习惯上也称为内热能。温度的高低反映物质分子热运动的强度，因此也是物体具有热能多少的宏观标志之一。机械能是表示物体运动状态和高度的物理量，它主要包括物体的动能和势能，二者统称为宏观机械能。由于电能具有传输、使用方便，且易于转换为其他形式的能量等优点，因而电能已成为建设现代社会物质文明的重要条件，电能利用占总能源利用中的比例已成为国民经济发展水平的标志。

能源是指能为人类生活与生产提供某种形式能量或动力的物质资源。能源是推动社会发展和经济进步的主要物质基础，能源的开发和利用水平是社会经济发展和科技水平的重要标志之一。随着能源科学技术的发展，能源开发的领域也越来越广，能源的种类日益增多，能源的分类方法也有多种。人们通常按照以下几种分类方式对能源分类。能源分类见表 0-1。

表 0-1 能源分类

类别		来自地球内部的能源	来自地球以外的能源		地球与其他天体相互作用产生的能源
一次能源	可再生能源	地热能	太阳能、水能、风能、生物质能	……	潮汐能
	非再生能源	核能	煤炭、石油、天然气	……	……
二次能源	蒸汽、电力、焦炭、煤气、酒精、氢、汽油、柴油、激光、沼气等				……

(1) 按能源的初始来源可分为三类:

- 1) 来自地球内部的能源。如核能、地热能。
- 2) 来自地球以外的能源。如太阳能以及由太阳能转化而来的风能、水能、生物质能以及煤炭、石油、天然气等。
- 3) 地球与其他天体相互作用产生的能源, 如潮汐能。

(2) 按能源开发的步骤, 可将能源分为一次能源和二次能源。

- 1) 一次能源。指在自然界中以自然形态存在可以直接开发利用的能源, 如太阳能、煤炭、石油、天然气、风能、水能、地热能及海洋能等。
- 2) 二次能源。指由一次能源直接或间接转化而来的能源, 如蒸汽、电力、焦炭、煤气、酒精、甲醇、氢、汽油、柴油、激光及沼气等。

(3) 按能源可否再生, 可将一次能源分为可再生能源和非再生能源。

- 1) 可再生能源。指不会因被开发利用而减少, 具有天然恢复能力的能源, 如太阳能、风能、海洋能及生物质能等。
- 2) 非再生能源。指储量有限, 随被开发利用而日益减少, 最终将会枯竭的能源, 如煤、石油、天然气以及核能等。

(4) 按照能源的利用程度, 可将能源分为常规能源和新能源。

- 1) 常规能源。指开发时间较长、技术比较成熟、被广泛利用的能源, 如煤、石油、天然气及水能等。
- 2) 新能源。指开发时间较短、技术尚不成熟、尚未被大规模开发利用的能源, 如太阳能、风能、地热能、海洋能及生物质能等。新能源是相对于常规能源而言的, 现在的常规能源过去曾是新能源, 今天的新能源, 但随着科技和社会的发展, 将来会成为常规能源。新能源大多数是可再生能源, 资源丰富, 分布广阔, 是未来的主要能源之一。对于核能, 因其仍是发展中的能源, 故仍习惯地将其列入新能源范畴。

(5) 按照开发利用过程中对环境的污染程度, 可将能源分为清洁能源和非清洁能源。

- 1) 清洁能源。指对环境无污染或污染很小的能源, 如太阳能、水能、风能及海洋能等。
- 2) 非清洁能源。指对环境污染较大的能源, 如煤、石油及天然气等。

2. 热能的利用

能量的利用过程实质是能量的传递和转换过程。目前, 自然界中可被利用的能源主要有风能、水能、太阳能、地热能、矿物燃料的化学能和核能等, 但应用最广泛的仍然是矿物燃料(煤、石油及天然气等)的化学能。在这些能源中, 风能、水能、海洋能可以通过风车、水轮机(水车)直接转换成机械能或者再通过发电机由机械能转换成电能, 太阳能可以通过光合作用转换成生物质能或通过光电反应直接转换成电能。除此之外, 其他能源往往都需经过能量的转换, 以热能形式供人类利用。太阳能可以通过集热器转换成热能, 地热能以热水和蒸汽的形式直接提供热能, 矿物燃料(煤、石油、天然气等燃料)通过燃烧将化学能转变为热能, 核能通过裂变或聚变反应转换为热能。能源的转换与利用关系如图 0-1 所示。据统计, 目前, 通过热能形式被利用的能源在我国占总能源利用的 90% 以上, 世界其他国家也平均超过 85%。由此可见, 在能量转换与利用过程中, 热能不仅是最常见的形式, 而且具有特殊重要的作用。热能的有效利用对于解决我国的能源问题乃至对人类社会的发展有着重大意义。

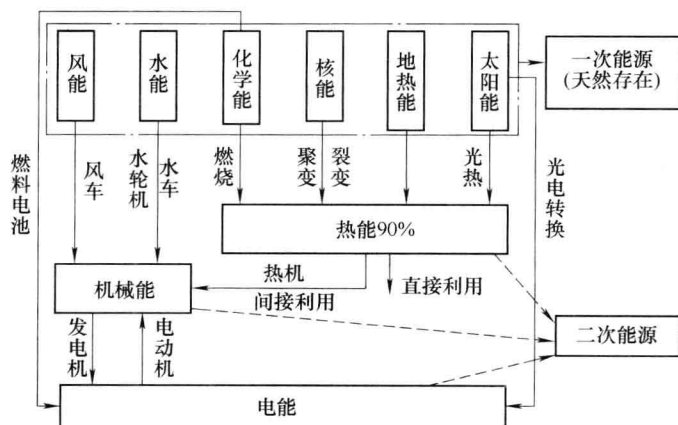


图 0-1 能源的转换与利用关系

热能的利用有如下两种方式：

1) 直接利用。即将热能直接用于加热物体。如在冶金、化工、纺织、造纸轻工等生产部门，通过各种加热设备（或热交换器）将热能直接用于冶炼、分馏、烘干、蒸煮、加热及熔化等生产工艺过程中，在人们的日常生活中，可将热能用于采暖、洗浴及烧饭等。这种利用方式已具有几千年的历史。

2) 间接利用。通常是指将热能转换成机械能（通过各种热力发动机）或者再转换成电能（通过发电机）为人类的日常生活、生产及交通运输提供动力。如车辆、船舶及飞机等使用的热力发动机，又如火力发电厂将燃料的化学能转换成热能，并最终转换为电能加以利用。

自从 18 世纪中叶发明蒸汽机以来，至今虽然只有 200 多年的历史，但却开创了热能动力利用的新纪元，使人类社会的生产力和科学技术的发展突飞猛进。然而，热能通过各种热机转换为机械能的有效利用程度（热效率）较低，早期蒸汽机的热效率只有 1% ~ 2%，现代燃气轮机装置的热效率为 37% ~ 42%，火力发电厂的热效率也只有 40% 左右。如何更有效地实现热能和机械能之间的转换，提高热机的热效率是我们面临的重要课题，所以研究热能的性质及其转换规律对社会经济发展就显得非常重要。

虽然，在生产和生活中热能的直接利用极为广泛，但应用最广泛的能量形式是机械能和电能。绝大多数的机械能和电能是由热能转换而来，将热能转换为机械能或电能再间接利用是能量生产与利用的最主要方式之一。

3. 热机、工质、热源

热能转换为机械能必须借助一套设备和载能媒介物质才能实现。我们将热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置（或称热机）。工程中的热能动力装置主要有蒸汽动力装置和燃气动力装置两大类。前者如火电厂中的蒸汽动力装置和蒸汽机装置等；后者如内燃机、燃气轮机及喷气发动机装置等。用来实现能量相互转换的媒介物质称为工质。它是实现能量转换必不可少的内部条件，如火电厂中的水蒸气，内燃机中的燃气，制冷装置（机械能转换为热能的装置）中的氨蒸气及氟利昂蒸气等。热能工程中，常用的工质有理想气体和水蒸气两种。

图 0-2 为火电厂蒸汽动力装置示意图。它由锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵等设备组成。燃料在锅炉内燃烧后成为高温烟气，使燃料的化学能转变为热能，水在锅炉中吸收烟气的热量后成为高温高压的过热蒸汽，此过程为水和水蒸气的吸热过程。当过热蒸汽被导入汽轮机后，在汽轮机中绝热膨胀，将蒸汽热能转换为机械能，此过程是水蒸气的膨胀做功过程。汽轮机带动发电机发电，将机械能转变为电能。做功后的蒸汽（乏汽）排入凝汽器，被冷却水冷却，释放热量而凝结成水，此过程是水蒸气的放热过程。凝结水由给水泵升压后送回锅炉，此过程是水的压缩过程。这样，在蒸汽动力装置中，水（水蒸气）经历了吸热、膨胀、放热和压缩等过程，如此循环往复，就将燃料燃烧时放出的热能连续不断地转换为机械能。

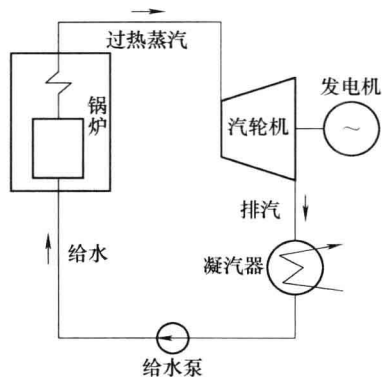


图 0-2 火电厂蒸汽动力装置示意图

由此可见，在蒸汽动力装置中，能量的转换是通过工质在各种设备中吸热、膨胀、放热和压缩等过程来实现的，这就要求工质必须具有良好的膨胀性和流动性，在物质的气（汽）、液、固三态中，只有气（汽）态物质最适合。因此，动力装置中的工质只能是气（汽）态物质以及涉及气态物质相变的液体。同时，为了更好地实现热能和机械能间相互转换，还要求工质必须具有热力性能稳定、热容量大、安全性好、对环境友善、价廉、易大量获取等特点。目前，火力发电厂中常采用水及水蒸气作为工质。不同的工质实现能量转换的特性是不同的，有的相差甚远，因此研究工质的性质是工程热力学的任务之一。

从蒸汽动力装置的工作过程可以看出，为使热能连续不断地转化为机械能，除必须凭借工质（水蒸气）作为中间媒介外，还必须具有连续不断地为工质提供热能的物体和接收工质放出余热的物体。我们把不断向工质提供热能的高温恒温物体称为高温热源 T_1 ，简称热源，如锅炉中的高温烟气。同样将不断接收工质排放余热的恒温低温物体，称为低温热源 T_2 ，简称冷源，如凝汽器或大气环境。热源或冷源不会因放热或吸热发生温度变化，其热容量可视为无限大。

热能动力装置的工作原理可以概括为工质从高温热源吸收的热量 Q_1 ，一部分通过热机转换为机械能 W_0 ，另一部分热量 Q_2 释放给低温热源，即有 $W_0 = Q_1 - Q_2$ 。图 0-3 为热能动力装置的工作原理示意图。

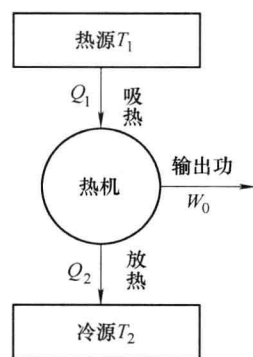


图 0-3 热能动力装置工作原理示意图

0.2 火力发电厂的生产过程

电力工业是我国最重要的基础能源产业，它对促进国民经济的发展和社会进步起着重要作用，它不仅是关系国家经济安全的战略大问题，而且与人们的日常生活、社会稳定密切相关。随着我国经济的发展，电力工业也得到了迅速发展。1949 年以来，我国电力以年均 10% 以上的速度增长，这在世界电力发展历史上都是罕见的。国家能源局发布的最新数据显

示,到2012年底,中国已成为世界第一能源生产大国。据中国电力企业联合会发布的《2011年全国电力供需情况及2012年分析预测》称,截至2011年底,全国发电装机容量已达10.56亿kW,其中,火电装机容量达7.65亿kW,约占总装机容量的72.5%;水电2.31亿kW,核电1257万kW,并网风电4505万kW,太阳能发电214万kW。2011年全国发电量为47217亿kW·h,其中,火电38975亿kW·h,占全国发电量的82.54%;我国装机容量和发电量首次超过美国,居世界首位。同时火电电源结构也得到不断改善,火电机组正朝着大容量、高参数、高效率、环保型方向发展,至2011年底,全国在运100万kW超超临界火电机组达39台,投运、在建、拟建的百万千瓦超超临界机组数量居全球之首。根据我国能源结构特点,预计在今后相当长的一段时间内,火力发电仍将占据主导地位。

1. 火力发电厂的能量转换过程

发电厂是把各种动力能源的能量转变成电能的工厂。根据所利用的能源形式可分为火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、地热发电厂及风力发电厂等。火力发电厂简称火电厂,是利用煤、石油、天然气等燃料的化学能生产电能的工厂,我国火电厂以燃煤为主。按其功用可分为两类,即凝汽式电厂和热电厂。前者仅向用户供应电能,而热电厂除供给用户电量外,还向热用户供应蒸汽和热水,即所谓的“热电联合生产”。火力发电厂的生产过程实质上就能量的转换过程,其能量转换主要通过锅炉、汽轮机和发电机三大主机来完成。在锅炉中将燃料中的化学能转换为热能,在汽轮机中再将热能转换为机械能,最后在发电机中将机械能转换为电能。火电厂的能量转换示意图如图0-4所示。

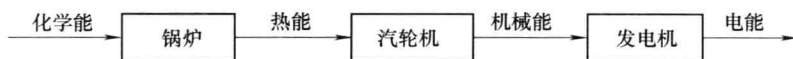


图 0-4 火电厂的能量转换示意图

火电厂的容量大小各异,具体形式也不尽相同,但就其生产的基本过程都是相似的。图0-5为凝汽式燃煤电厂生产过程示意图,下面主要以此图为例介绍其生产流程。

2. 火电厂生产流程及主要系统

(1) 燃料燃烧及风烟系统 火电厂燃烧及风烟系统工作流程如图0-6所示。通过各种运输方式,燃煤被运送到电厂的煤场,然后用运输带将燃煤从煤场运至煤斗中,大型火电厂为提高燃煤效率都是燃烧煤粉。因此,煤斗中的原煤要先送至制粉系统中的磨煤机内磨成煤粉,磨碎的煤粉由热空气(经空气预热器加热的空气)携带经排粉风机送入锅炉的炉膛内燃烧。煤粉燃烧后形成的热烟气沿锅炉的水平烟道和尾部烟道流动,在锅炉的各种受热面中放出热量,最后进入除尘器,将燃烧后的煤灰分离出来。洁净的烟气在引风机的作用下通过烟囱排入大气。助燃用的空气由送风机送入装设在尾部烟道上的空气预热器内,利用热烟气加热空气。这样,一方面可使进入锅炉的空气温度提高,以利于煤粉的着火和燃烧,另一方面也可以降低排烟温度,提高热能的利用率。从空气预热器排出的热空气分为两股:一股(一次风)去磨煤机干燥和输送煤粉,另一股(二次风)直接送入炉膛助燃。燃煤燃尽的灰渣落入炉膛下面的渣斗内,与从除尘器分离出的细灰一起用水冲至灰浆泵房内,再由灰浆泵送至灰场。

(2) 主要汽水流程系统 锅炉的给水先进入锅炉尾部烟道的省煤器,被烟气的余热加热后进入汽包,再经炉墙外侧的下降管流入锅炉底部下联箱,经下联箱分配进入炉膛内由许

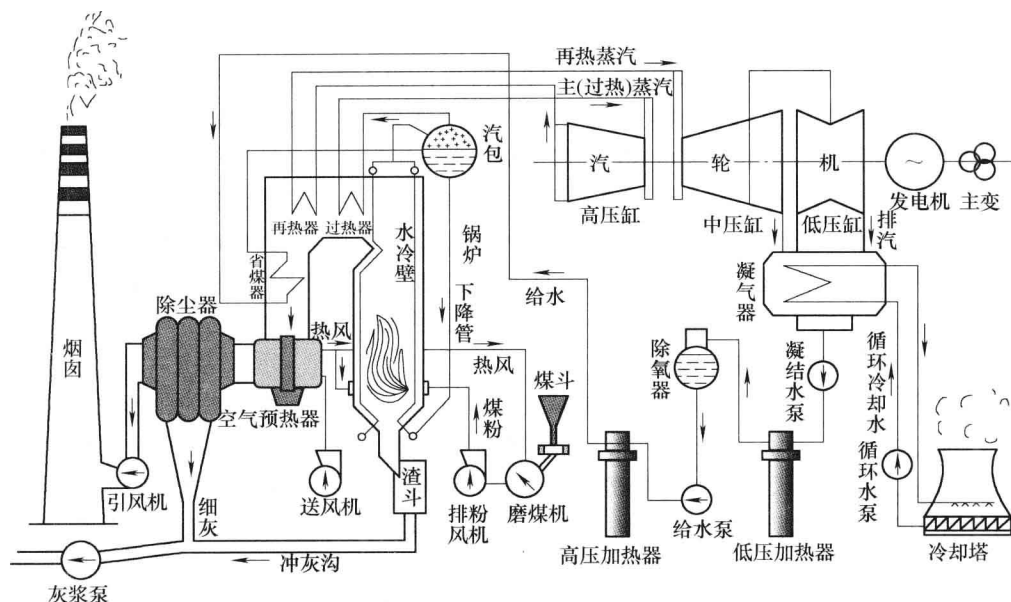


图 0-5 火电厂生产过程示意图

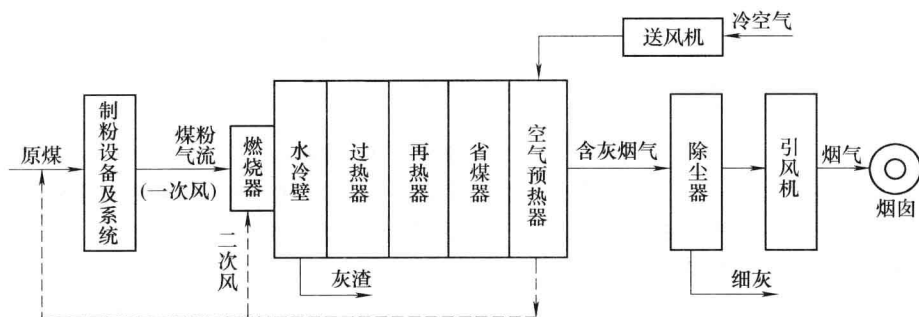


图 0-6 火电厂燃烧及风烟系统工作流程

多水管组成的水冷壁。水在水冷壁内吸收炉膛烟气的热量，被加热直到汽化，汽水混合物沿水冷壁再次进入汽包，经汽包内汽水分离器实现汽和水的分离。分离后的水又通过下降管、下联箱进入水冷壁继续吸热汽化；而分离出的饱和蒸汽进入过热器，在过热器内继续吸热成为过热蒸汽。高压高温过热蒸汽经主蒸汽管道导入汽轮机高压缸膨胀做功后，然后引出再送入锅炉再热器加热升温，升温后的再热蒸汽导入汽轮机的中、低压缸继续膨胀做功，过热和再热蒸汽冲动汽轮机转子，使汽轮机高速旋转实现热能转换为机械能。

在汽轮机低压缸内做功后的蒸汽（称为乏汽）排入凝汽器，并在其中被循环冷却水冷却凝结成水（称为主凝结水），汇集在凝汽器下部热水井中的主凝结水，经除盐装置后，用凝结水泵打入低压加热器，经加热后送入除氧器。经除氧器除氧并加热后的主凝结水称为锅炉的给水，借助给水泵升压后，经过高压加热器加热送入锅炉的省煤器，然后又重复上述过程。火电厂主要汽水系统工作流程如图 0-7 所示。

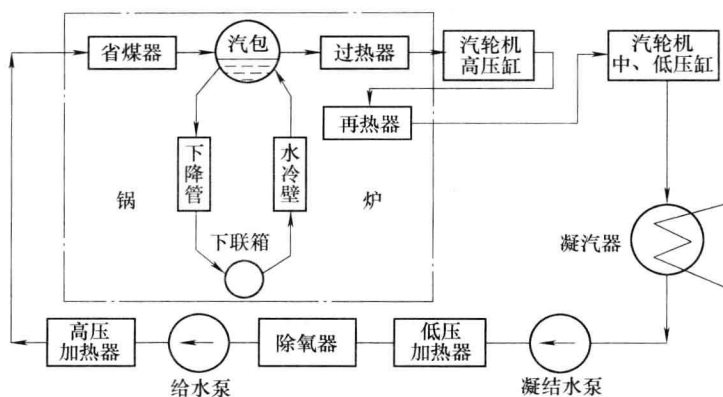


图 0-7 火电厂主要汽水系统工作流程

低压加热器、除氧器和高压加热器的加热汽来自于汽轮机的抽汽。凝汽器中的循环冷却水来自循环冷却水系统。

(3) 发电机及电气系统 汽轮机的转子与发电机的转子通过联轴器联在一起，当汽轮机转子转动时便带动发电机转子转动。在发电机转子的另一端带着一小直流发电机，称为励磁机。励磁机发出的直流电送至发电机的转子线圈中，使转子周围产生磁场。当发电机转子旋转时，磁场也是旋转的，发电机定子内的导线就会切割磁力线产生感应电流。这样，发电机便把汽轮机的机械能转变成了电能。电能经变压器（主变）升压后，由高压配电装置和输电线路向外供电。

除了上述的主要系统外，火电厂还有其他一些辅助生产系统，如燃煤的输送系统、水的化学处理系统、自动控制系统、循环冷却水系统、真空系统及灰浆的排放系统等。这些系统与主系统协调工作，它们相互配合完成电能的生产任务。

0.3 “热工基础”课程的主要内容及其在专业中的作用

1. 主要内容

热工基础课程是研究热能利用的基本原理和规律，以提高热能利用经济性（即节能）为主要目的的应用性学科，由工程热力学和传热学两部分组成。为了更好地间接利用热能，必须研究热能与其他能量形式间相互转换的规律，工程热力学就是研究热能与机械能间相互转换的规律及方法的一门应用学科；为了更好地直接利用热能，必须研究热量的传递规律，而传热学就是研究热量传递的规律的一门应用学科。

(1) 工程热力学的主要研究内容 工程热力学以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，着重阐述工质的热力性质、基本热力过程和热力循环中热功转换规律，最终提出提高能量利用效率的途径和措施。它主要包括以下三个方面的内容：

1) 热力学基本概念和基本定律。如热力系统、平衡状态及状态参数、热力学第一定律和热力学第二定律等。热力学第一定律说明能量转换或传递中的数量守恒关系；热力学第二定律说明热过程进行的方向、条件、深度等问题，并由此指出能量的质的特性。工程热力学就是以这两个定律为基础而建立的一门工程技术科学。

2) 工质的热力性质。热能转换为机械能是通过工质来实现的, 只有深刻认识工质的热力性质, 才能更好地掌握和应用热能与机械能之间的转换规律, 在工程热力学中主要研究的是气体和蒸汽的热力性质, 对电厂热能动力装置和火电厂集控运行等专业来讲, 主要研究理想气体和水蒸汽的热力性质。

3) 热力过程与热力循环。即应用热力学基本定律, 分析计算工质在热力设备中所经历的状态变化过程和循环过程, 并在此基础上进一步分析影响能量转换效率的因素, 探讨提高转换效率的途径。

(2) 传热学的主要研究内容 传热学以分析三种基本传热方式(导热、对流及辐射)的规律为基础, 进而研究复杂传热过程和实际换热设备的传热特点, 最终找出增强传热或削弱传热的途径和方法。它主要包括以下四个方面的内容:

1) 导热。导热的基本概念、基本定律、稳态导热和非稳态导热问题的求解。

2) 对流换热。对流换热的基本概念、换热过程的物理和数学模型的建立及一般求解方法, 经验公式的选择和应用。

3) 热辐射及辐射换热。辐射换热的基本概念及有关规律, 物体间辐射换热的一般计算。

4) 传热及换热器。传热过程的分析计算; 换热器形式、传热特点及热计算, 传热的增强与削弱等。

工程热力学和传热学都是研究热现象的, 但其各有侧重。例如一杯热水, 放在桌上冷却, 工程热力学可分析得出热水下降到室温所放出的热量; 传热学则研究热量如何传出、热水下降到室温需要多少时间、单位时间传递的热量等, 涉及传热过程的快慢。

2. 本课程在专业中的作用

火电厂的系统及生产过程中, 涉及热工基础知识的地方很多。电厂热力设备的主要工作过程实质就是热能与机械能的转换及热量的传递过程, 如汽轮机设备工作过程是将蒸汽热能转换为机械能的过程, 锅炉内的各种受热面(水冷壁、过热器、再热器、省煤器和空气预热器)、汽轮机车间的凝汽器、加热器、冷却器等设备内完成的是热量传递过程。如何才能实现和提高能量转换和热量传递的效率? 这些过程中遵循什么规律? 以及怎样提高电厂的热经济性? 都涉及本课程所讨论的内容。

高职高专电厂热能动力装置、火电厂集控运行和热工检测与控制技术等专业毕业生主要从事火电厂设备的运行、检修、安装以及设计等方面的工作, 这都要涉及本课程的基本知识, 因此“热工基础”课程是电厂热能动力类专业的主要专业技术基础课。通过本课程的学习, 要求学生掌握有关热力学基本定律、气体工质的性质、工质的状态参数以及变化时的热量计算等基础理论知识; 要求掌握导热、对流和辐射换热过程以及稳定传热的基础理论, 掌握换热器的工作原理、基本构造及相关计算, 为专业课的热工计算和热力分析打下理论基础, 并获得初步的计算和分析能力。因而, 学好本课程将为学习“锅炉设备及运行”、“汽轮机设备及运行”、“热力发电厂”等专业课以及毕业后从事火电厂方面的技术工作奠定重要基础。

“热工基础”课程着重研究热功转换和热量传递等宏观热现象, 所以, 主要应用宏观的研究方法对热现象进行具体的观察和分析。但为了说明热现象的本质及其根本原因, 有时也用微观理论去进行解释。为分析问题方便, 还常常采用科学抽象、对实际复杂问题进行理想