

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



REGONG JICHU

# 热工基础

王修彦 张晓东 合编



中国电力出版社

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

普通高等教育“十一五”  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU G

TK122/7

2007

REGONG JICHU  
**热工基础**

王修彦 张晓东 合 编  
张学学 主 审



中国电力出版社

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



## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书包括工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，在学习了工质（主要是理想气体和水蒸气）的热力性质后，主要讲述热功转换的基本规律，探求能量的高效利用途径。传热学部分在研究三种基本传热方式的基础上，讲述了换热器的计算问题，这部分内容对学生掌握强化传热技术是很有作用的。

本书注重理论联系实际，将电厂的实际问题融入理论的讲解中。为了体现精讲多练的原则，本书配有大量的例题、习题，同时习题具有一定的难度，便于学有余力的同学钻研。

本书可作为非能源动力类专业大学本科 48~64 学时的热工基础课程或工程热力学与传热学课程的教材或教学参考书，也可以供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

热工基础/王修彦等编. —北京: 中国电力出版社, 2007.7  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5083 - 5547 - 4

I. 热... II. 王... III. 热工学—高等学校—教材  
IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 066455 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>)  
汇鑫印务有限公司印刷  
各地新华书店经售

\*  
2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 438 千字 1 插页  
印数 0001—3000 册 定价 29.80 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

热现象是自然界最普遍的物理现象，热科学已经深入到除能源动力之外的机械、电子、冶金、航空航天及生物医学工程等领域。在提倡建设节约型社会的今天，我国政府提出在保证经济适度增长的同时降低单位产值的能耗。因此，对于高等院校培养非动力类工程技术人才来说，学习热工基础课是非常有必要的。

全书包括工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学以热力学第一定律和热力学第二定律为基础，在学习了工质（主要是理想气体和水蒸气）的热力性质后，主要讲述热功转换的基本规律，探求能量的高效利用途径。传热学部分在研究三种基本传热方式的基础上，讲述了换热器的计算问题，这部分内容对学生掌握强化传热技术是很有帮助的。

在长期的教学过程中，我们积累了较丰富的教学经验。在多次对来自现场的工程技术人员进行培训的过程中，我们也从他们身上学到了一些实际知识。因此，本教材的特点之一就是理论联系实际的内容较多，特别是一些来自电厂的实际问题。本教材的另一个特点是例题、习题的量比较大，体现了精讲多练的原则，有的习题有一定的难度，便于学有余力的同学钻研。

在以网络技术为主要特征的当今信息化社会，学生通过网络获取知识是一个重要的方面，因此教学内容应该是开放式的，而不是仅仅在于教会学生多少知识。在这方面我们做了一些尝试，我们只是提出了与课程内容有关的一些问题，并没有给出答案，引导学生上网查找资料，解决这些问题，以此培养学生获取知识和解决问题的能力。

本书可作为非能源动力类各专业大学本科 48~64 学时的热工基础课程或工程热力学与传热学课程的教材或教学参考书，也可以供有关工程技术人员参考。

本书由华北电力大学王修彦副教授、张晓东副教授合编。王修彦编写工程热力学和附录部分内容，张晓东编写传热学部分内容。本书由清华大学张学学教授主审。

由于编者水平所限，难免有疏漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2007 年 4 月

## 目 录

前言	
绪论	1
0-1 能量及其利用	1
0-2 火力发电厂的生产过程	2
0-3 学习《热工基础》的重要意义	3
第一章 基本概念	5
1-1 工质和热力学系统	5
1-2 状态参数	7
1-3 平衡状态	11
1-4 热力过程	12
1-5 功和热量	14
1-6 热力循环	16
思考题	18
习题	18
第二章 热力学基本定律	20
2-1 热力学第一定律的实质	20
2-2 热力学能	20
2-3 闭口系统能量方程	21
2-4 流动功和焓	22
2-5 稳定流动能量方程及其应用	23
2-6 热力学第二定律	27
2-7 卡诺循环与卡诺定理	28
2-8 熵与熵增原理	32
2-9 焓分析方法简介	37
思考题	39
习题	40
第三章 理想气体的性质和热力过程	44
3-1 理想气体状态方程	44
3-2 理想气体的比热容	45
3-3 理想气体的热力学能、焓、熵	49
3-4 理想气体混合物	52
3-5 理想气体的热力过程	56
3-6 气体的压缩	63
思考题	70

习题 .....	71
<b>第四章 水蒸气和湿空气 .....</b>	<b>74</b>
4-1 水的相变及相图 .....	74
4-2 水的定压汽化过程 .....	76
4-3 水蒸气的状态参数和水蒸气表 .....	77
4-4 水蒸气焓熵图及其应用 .....	81
4-5 湿空气的性质 .....	83
4-6 湿空气的焓-湿图 .....	86
4-7 湿空气的热力过程 .....	88
思考题 .....	90
习题 .....	91
<b>第五章 气体和蒸汽的流动 .....</b>	<b>94</b>
5-1 一维稳定流动的基本方程式 .....	94
5-2 促使流动改变的条件 .....	95
5-3 定熵滞止参数 .....	97
5-4 喷管的计算 .....	98
5-5 有摩擦阻力的绝热流动 .....	101
思考题 .....	103
习题 .....	103
<b>第六章 动力装置循环 .....</b>	<b>106</b>
6-1 概述 .....	106
6-2 基本的蒸汽动力循环——朗肯循环 .....	106
6-3 再热循环 .....	111
6-4 回热循环 .....	113
6-5 热电联产循环 .....	115
6-6 燃气轮机装置循环 .....	117
6-7 活塞式内燃机循环简介 .....	123
思考题 .....	125
习题 .....	125
<b>第七章 制冷循环 .....</b>	<b>128</b>
7-1 概述 .....	128
7-2 压缩空气制冷循环 .....	129
7-3 压缩蒸汽制冷循环 .....	131
7-4 吸收式制冷循环 .....	133
7-5 蒸汽喷射式制冷循环 .....	134
7-6 热泵 .....	135
思考题 .....	136
习题 .....	137

<b>第八章 传热学概述</b> .....	138
8-1 绪论 .....	138
8-2 传热的三种基本方式 .....	138
思考题 .....	141
习题 .....	141
<b>第九章 导热</b> .....	143
9-1 导热基本定律与导热微分方程 .....	143
9-2 通过平壁和圆筒壁的一维稳态导热 .....	148
9-3 准一维稳态导热 .....	155
9-4 具有内热源的一维稳态导热 .....	161
9-5 非稳态导热 .....	164
思考题 .....	173
习题 .....	173
<b>第十章 对流换热</b> .....	176
10-1 对流换热过程分析 .....	176
10-2 对流换热问题的数学描写 .....	179
10-3 受迫对流换热的特征数方程 .....	184
10-4 自然对流换热.....	194
10-5 凝结与沸腾换热 .....	197
思考题 .....	204
习题 .....	204
<b>第十一章 热辐射和辐射换热</b> .....	206
11-1 热辐射的基本概念 .....	206
11-2 黑体辐射的基本定律 .....	209
11-3 实际物体的表面辐射特性 .....	213
11-4 辐射角系数 .....	218
11-5 漫灰表面之间辐射换热的计算 .....	224
思考题 .....	229
习题 .....	229
<b>第十二章 传热过程与换热器</b> .....	232
12-1 传热过程 .....	232
12-2 换热器及其计算 .....	238
思考题 .....	249
习题 .....	249
<b>附录</b> .....	251
附表1 常用气体的平均质量定压热容 .....	251
附表2 常用气体的平均质量定容热容 .....	252
附表3 气体的平均质量热容(直线关系式) .....	253

附表 4	空气的热力性质	254
附表 5	饱和水和水蒸气的热力性质 (按温度排列)	257
附表 6	饱和水和水蒸气的热力性质 (按压力排列)	259
附表 7	未饱和水与过热蒸汽热力性质表	261
附表 8	氨 (NH <sub>3</sub> ) 饱和液与饱和蒸汽的热力性质表	268
附表 9	氟里昂 134a 饱和液与饱和蒸汽的热力性质表 (按温度排列)	270
附表 10	氟里昂 134a 饱和液与饱和蒸汽的热力性质表 (按压力排列)	271
附表 11	几种材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率	272
附表 12	标准大气压下干空气的物性参数	273
附表 13	饱和水的热物理性质	274
附表 14	干饱和水蒸气的热物理性质	275
附表 15	标准大气压下过热水蒸气的热物理性质	276
附表 16	几种饱和液体的热物理性质	277
附表 17	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	280
附图 1	氨的压焓图	281
附图 2	R134a 的压焓图	282
附图 3	湿空气的焓-湿图	



## 绪 论

### 0-1 能量及其利用

能源是指能够直接或间接提供能量的物质资源。地球上存在各种形式的能源。按照开发的步骤来分类,能源可分为一次能源和二次能源。一次能源是指在自然界中以自然形态存在可以直接开发利用的能源,如煤、石油、天然气、风能、水能、太阳能、地热能、海洋能等;二次能源是指由一次能源直接或间接转化而来的能源,如电力、煤气、汽油、沼气、氢气、甲醇、酒精等。

能源与人类文明和社会发展一直紧密地联系在一起,能源的利用方式和程度是社会文明的重要标志之一,是全世界关注的重大问题。在当今世界,能源问题更是渗透到社会生活的各个方面,直接关系到国家安全和社会稳定。世界各国的经济发展实践证明,正常情况下,每个国家能源消费总量及增长速度与其国民经济总产值及增长速度成正比,能源的人均消耗量则反映了国民生活水平的高低。

我国是世界上能源蕴藏量最丰富的国家之一,煤炭储量居世界第三,水力资源的储量居世界首位。从1995年开始,我国煤炭产量已居世界第一,发电量居世界第二,原油产量为世界第五。目前我国电力工业正以前所未有的速度迅速发展,中国1987年发电装机容量达到1亿kW,从中国开始有电的1879年到装机容量达到1亿kW,总共花了108年时间。又用了8年时间,到1995年中国发电装机容量达第2个1亿kW。又只花了5年时间,到2000年中国发电装机容量达到第3个1亿kW。到2005年年底,中国总装机容量已达到5.1亿kW。

但是由于人口众多,中国人均能源资源可采储量远低于世界的平均水平,石油、天然气人均可采储量分别只有世界平均水平的11.1%和4.3%。2004年,人均发电装机容量只有0.33kW,人均用电量1700kW·h,还没有达到世界用电的平均水平——3000kW·h,电力发展的任务光荣而艰巨,电力工业任重而道远。

近年来,随着经济的增长,中国的能源需求不断增加,特别是自1993年成为石油净进口国以来,石油进口量持续增长。2005年石油净进口量达到1.19亿t,石油对外依存度已经超过40%。为解决能源安全这一影响国家安全的重大战略问题,中国政府正在采取一系列政策措施。

第一,坚持把立足国内作为解决中国资源问题的基本方针。中国既是资源消费大国,也是资源生产大国。从能源看,中国煤炭资源丰富,煤炭是中国能源的主体。在一次能源生产结构中,煤炭占76%;在一次能源消费结构中,煤炭占68%。20世纪90年代以来,中国能源总自给率始终保持在90%以上。未来中国国内能源供应的潜力仍然很大。目前,中国煤炭查明储量仅占预测资源总量20%左右,发现新油气田仍有可能,三分之二的水电资源尚未开发,核电、风电、生物质发电刚刚起步,还有很大的发展余地。因此,我们有条件主要依靠国内来保障资源供给。中国的发展,过去不曾、现在没有、将来也不会对世界能源安全造成威胁。我们将继续坚持立足国内的基本方针,采取综合措施,加大国内资源勘探力

度, 不断增加能源有效供给, 保持较高的自给水平。

第二, 坚持把开源与节流结合、节约放在首位作为解决中国资源问题的根本出路。在推进工业化的过程中, 将节约能源、降低能耗提升到基本国策的高度, “十一五”规划提出了建立“资源节约型社会”、在“十一五”计划期间将单位 GDP 能耗降低 20% 的目标。我们要按照建立节约型社会的要求, 认真贯彻《节约能源法》, 落实《节能中长期专项规划》, 组织实施好重大节能工程, 推广使用先进、高效的节能设备和器具, 推进工业、交通运输、建筑、商用和民用节能。要建立市场化的资源节约体制和机制, 研究制定有利于节约资源的财税、投资、价格和外贸政策, 制定和实施强制性标准, 形成可持续的生产方式和消费模式。

人类历史上的大多数时间里使用的主要是可再生能源, 只是在工业革命后化石燃料才被大量使用。目前, 核能、水能、氢能、太阳能、风能、潮汐能等比较洁净的能源在世界各地都已得到不同程度的利用。特别是随着科学技术的进步, 人类对可再生能源的认识不断深化, 可再生能源的开发利用日益受到重视。实施能源多元化战略, 积极开发可再生能源成为许多国家能源安全政策的核心内容。然而, 受地域、时间、技术和资源多寡等多方面因素的限制, 上述能源在大规模推广方面还存在一定困难。面对世界经济的飞速发展和能源需求的不断增加, 加快能源研究步伐、开发矿物燃料的替代能源, 已成为摆在全人类面前的一项紧迫的任务。走能源与环境和经济发展良性循环的路子, 是解决能源安全问题的根本出路。2004 年制定的《中国能源中长期发展规划》明确指出, 当前和今后一段时期, 中国将把优化能源结构作为保障能源供应的中心任务, 大力开发水电、积极推进核电建设、鼓励发展风电和生物质能等可再生能源, 到 2020 年, 使可再生能源在能源结构中的比重从目前的 7% 提高到 15% 左右。

中国政府将进一步支持可再生能源的开发利用, 把可再生能源发展作为增加能源供应、调整能源结构、保护环境、消除贫困、促进可持续发展的重要措施。我们将加快发展技术成熟的水电、太阳能热水器和沼气等可再生能源, 尽快使资源得到合理开发利用; 同时积极推进资源潜力巨大, 技术基本成熟的风力发电、生物质发电、太阳能发电、生物质液化等可再生能源技术的发展, 以规模化建设带动产业化发展, 使其尽快成为具有竞争力的商业化能源。根据可再生能源的中长期发展规划, 到 2020 年, 水电总装机容量将达到 2.9 亿 kW, 开发程度达到 70% 左右, 生物质发电达到 2000 万 kW, 风电达到 3000 万 kW、太阳能发电达到 200 万 kW, 力争使可再生能源发电装机在总电力装机容量的比例达到 30% 以上; 我国将鼓励太阳能热水器在城市建筑物和农村的推广应用, 到 2020 年太阳能热水器总集热面积达到 3 亿  $\text{m}^2$ , 年替代化石能源约 4000 万 t 标准煤; 将农村生物质能开发利用作为发展现代农业、建设社会主义新农村的重要措施, 继续推广户用沼气和禽畜养殖场沼气工程, 加快生物质成型颗粒燃料的推广应用, 到 2020 年沼气年利用量达到 240 亿  $\text{m}^3$ 、生物质成型颗粒燃料年利用量达到 5000 万 t 左右, 同时积极发展以能源作物为主要原料的生物质液体燃料, 到 2020 年达到年替代石油 1000 万 t 的能力。

## 0-2 火力发电厂的生产过程

总体来说, 火力发电厂在锅炉中将燃料的化学能转化为热能, 在汽轮机中将热能转变为机械能, 通过发电机将机械能最终转变为电能。具体的生产过程如图 0-1 所示。

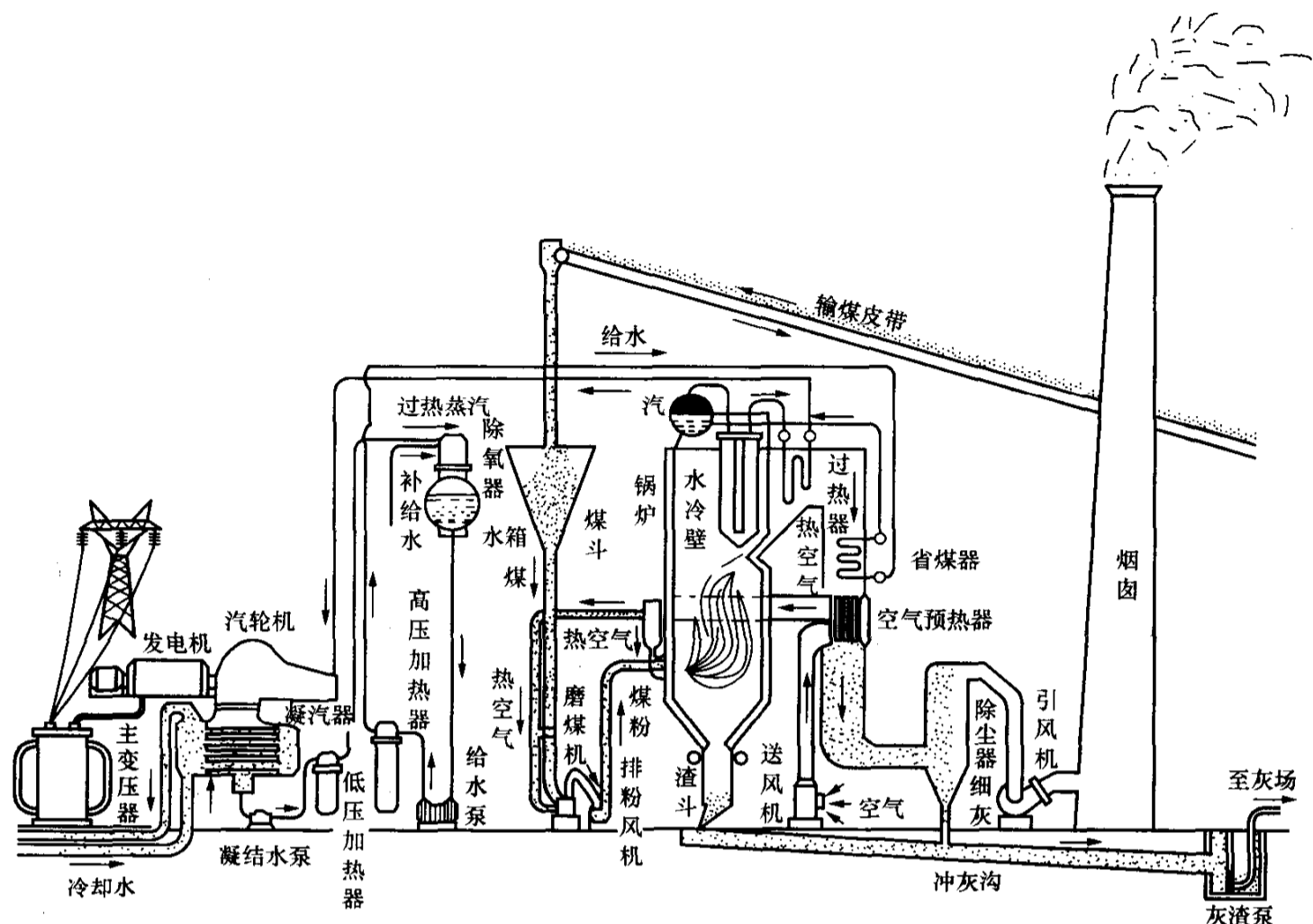


图 0-1 火力发电厂的生产过程

煤—烟气侧：煤通过输煤皮带送至原煤斗，再经过磨煤机磨成很细的煤粉，煤粉经过排粉风机送入到炉膛内和经过空气预热器加热的空气混合燃烧，产生的热量首先传递给水冷壁管，然后随着烟气的流动，传递给过热器、再热器、省煤器、空气预热器，然后在除尘器中除掉绝大部分飞灰，最后通过引风机送入烟囱排入大气。

汽—水侧：凝结水经低压加热器、除氧器、高压加热器逐级加热后送入位于锅炉尾部烟道的省煤器中接受烟气的加热，然后送入汽包，汽包内的水经下降管送到锅炉下部，经联箱分配到各水冷壁管，水冷壁管内的水向上流动，受热后变成汽水混合物，送回汽包，经汽水分离器分离，饱和蒸汽送入到过热器中被加热成过热蒸汽。高温高压的过热蒸汽经主蒸汽管道送到汽轮机内膨胀做功，带动发电机发电。做完功的蒸汽称为乏汽，乏汽在凝汽器内放热凝结成水，乏汽放出的热量由循环冷却水带到环境中。

### 0-3 学习《热工基础》的重要意义

《热工基础》课程包括工程热力学和传热学两部分内容。热力学是研究热能与其他形式能量的转换规律的科学，它以热力学第一定律、热力学第二定律为基础，着重阐述工质的热物性、基本热力过程和动力基本循环中的热功转换规律，最终找出提高能量利用效率的途径。传热学是研究热量传递的规律的科学，它以三种基本传热方式（导热、对流、辐射）的特性为基础，进而研究复杂换热过程以及换热器的特性，最终找出增强传热和削弱传热的途径和方法。

在火力发电系统中，到处都要用到工程热力学和传热学的知识。蒸汽经过的热力循环是以朗肯循环为基础的，大型的火力发电机组还要采用再热和抽汽回热；要分析循环的功和热效率，还需要掌握蒸汽的特性；凝汽器、低压加热器、除氧器、高压加热器、水冷壁管、过热器、再热器、省煤器、空气预热器等等，通过导热、对流和辐射的方式传递热量。

热现象是自然界中最普遍的物理现象，除了在火力发电系统中要用到大量的热工基础知识外，很多专业中都有热现象，如单晶硅制造过程中的传热问题；机械电子器件中的热设计；建筑物的采暖、空调与通风；海水淡化过程中的传热传质问题；海洋资源利用中的热力学及传热传质问题；火箭发动机燃烧室中的工作过程；航空发动机的工作原理；微重力下的各类传热传质现象；热管应用于控制航天器的表面温度等等。西方国家的工程教育普遍把热工课程作为大多数工科学生的基本课程。如美国 MIT 的电子工程系及计算机科学系的本科生就开有统计力学与热力学课程。

过去一二百年西方国家在实现工业化过程中消耗了大量自然资源，造成了严重的环境污染，因此联合国在 1989 年提出了“可持续发展战略”。我国政府在 1994 年编制的“中国 21 世纪议程”中指出，走可持续发展的道路是中国在 21 世纪自身发展的必然选择。我国的人均能源资源并不丰富，我国的资源发展必然要走资源节约型的道路。热工基础课程是合理用能及节能理论中的基础和核心部分，对于培养工科学生掌握合理用能、节能的意识并懂得其基本技术有重要意义。

《热工基础》着重研究热功转换和热量传递等宏观现象，所以，主要应用宏观研究方法对热现象进行具体的观察和分析，为了分析问题方便，还常常采用科学抽象、对实际复杂的对象进行简化的研究方法。



## 第一章 基本概念

学习任何一门基本学科，首先应该掌握基本概念和定义。工程热力学是从实践经验中总结概括起来的学科，有许多抽象术语和概念，有的容易与日常用语混淆。因此，本章对一些重要的热力学学术语和概念作集中介绍，以便在学习后面各章时有共同语言。学好本章，将为学习工程热力学课程的全部内容打下良好的基础。

### 1-1 工质和热力学系统

工程热力学是研究能量转换的一门课程。把实现能量转化的媒介物质称为工质。例如，在火电厂蒸汽动力装置中，把热能转变为机械能的媒介物质水和水蒸气就是工质，又例如，在制冷装置中，氨从冷库吸热，通过压缩机压缩升压升温后，在冷凝器中向环境放热，这里氨就是工质，在制冷工程中又专门叫作制冷剂。

对工质的要求是：①膨胀性；②流动性；③热容量；④稳定性、安全性；⑤对环境友善；⑥价廉，易大量获取。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。

当人们研究各种不同形式能量相互转化与传递时，为了分析方便，往往把有相互联系的部分或全体分隔开来作为研究的对象。这种被人为地分隔开来作为热力学研究的对象称为热力学系统，简称热力系或系统。系统以外的部分称为外界，作为外界的最常见的例子就是与系统能量转化或传递有密切关系的自然环境。系统与外界之间的分界面称为边界，热力学系统通过边界与外界间发生各种能量与物质的相互作用。

系统的选取是人为的，主要取决于研究者关心的具体对象。还是以火电厂蒸汽动力装置为例，假如为了研究锅炉中能量的转化或传递关系，就可以如图 1-1 (a) 所示那样，把锅炉作为研究对象，把它从周围物体分隔开来，锅炉就是一个热力学系统。如果感兴趣的是汽轮机中做功量和输入蒸汽的关系，就可以如图 1-1 (b) 所示那样，选取汽轮机作为热力学系统。

假如为了研究加入锅炉的燃料量和汽轮机输出功的关系，就可以如图 1-1 (c) 所示那样，把整个蒸汽动力装置划作一个热力学系统。

根据分析对象的不同，常见的热力学系统有以下几种分类。

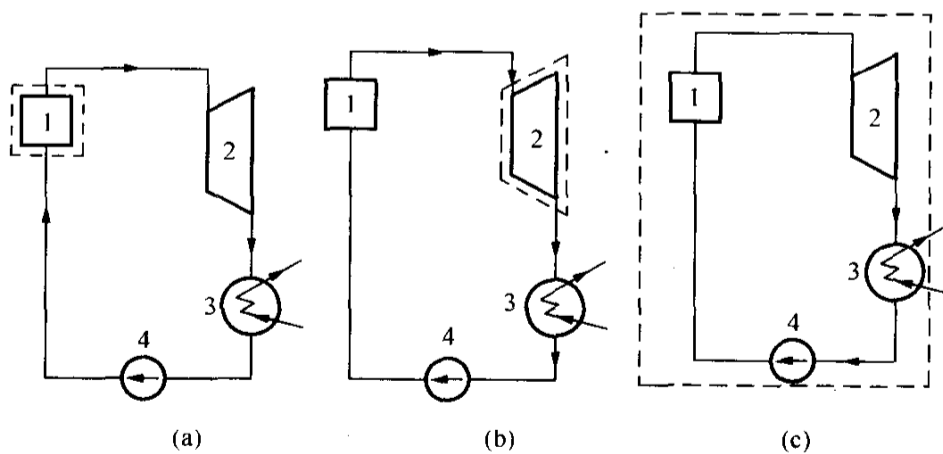


图 1-1 蒸汽动力系统

## 一、按照系统与外界有无物质交换来分

### 1. 闭口系统

与外界无物质交换的热力学系统称为**闭口系统**，又称为**封闭系统**。由于闭口系统内工质的质量固定不变，因此又称为**控制质量系统**。如图 1-2 所示，封闭汽缸中的定质量气体就属于此例。

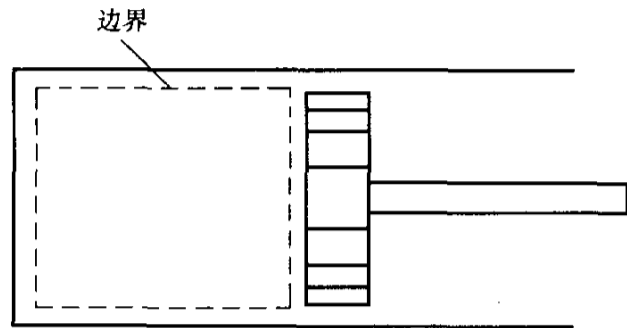


图 1-2 闭口系统

### 2. 开口系统

与外界有物质交换的热力学系统称为**开口系统**，通常开口系统总有一个相对固定的空间，故又称为**控制容积系统**。这类热力学系统的主要特点是在所分析的系统内工质是流动的，如图 1-3 所示。工程上绝大多数设备和装置都是开口系统。

值得指出，不论是闭口系统还是开口系统，两者之间都不是绝对的，是随着研究中心的改变而改变的。

如图 1-4 所示，看起来和图 1-3 是一样的，但此刻，关注的是某一小气团所组成的热力学系，假想它的外面有一看不见的膜将它包裹着，随着这一气团边流动边膨胀，包围这团气体的边界也边运动边扩大。此时，这个热力学系统内气体工质的质量不变，这个热力学系统就是一个闭口系统。

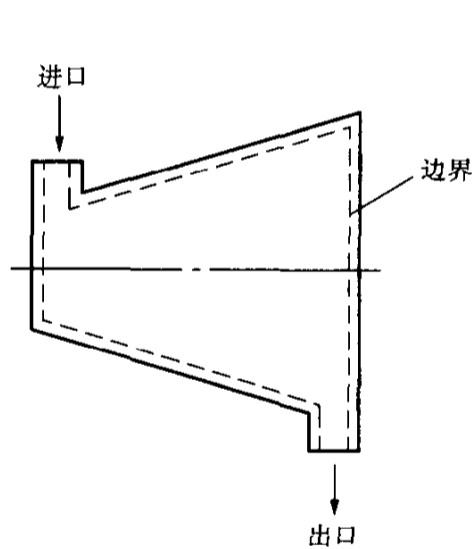


图 1-3 开口系统

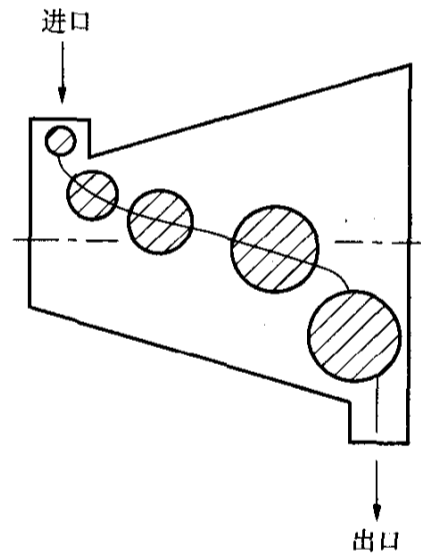


图 1-4 看似开口系统的闭口系统

可见，热力学系统的选取完全是人为的，主要取决于分析问题的需要与方便。另外，通过上面的内容可以看出，热力学系统的边界可以是固定的、真实的（如图 1-2 和图 1-3 所示），也可以是假想的、流动的（如图 1-4 所示）。

## 二、按照系统与外界在边界上是否存在能量交换来分

### 1. 非孤立系统

这类系统的特点是在分界面上，系统与外界存在物质或能量交换。

### 2. 孤立系统

这类热力学系统在分界面上与外界既不存在能量交换，也不存在物质交换。

### 3. 绝热系统

这类热力学系统在分界面上与外界不存在热量交换，但可以有功量和物质交换。例如，在分析火力发电厂时可以把汽轮机看成是绝热系统。

孤立系统和绝热系统是工程热力学中的特殊情况，实际的热力学系统多处于非孤立系统状态，但由于这两种特殊的热力学系统在热力学研究中有重要的作用，所以，在研究时，常常把实际热力学系统理想化，转化为孤立系统或绝热系统来分析，这样能使问题简化，便于更好地掌握问题的本质核心。

### 三、按照系统内工质的组成特征来分

#### 1. 单组分系统

这类热力学系统内的工质是由单纯组分的物质所组成。

#### 2. 多组分系统

这类热力学系统中的工质是由多种不同组分的介质组成，常见的烟气、干空气、湿空气就属于这类系统。

### 四、按照系统内工质的相态不同来分

#### 1. 单相系统

这类热力学系统内的工质只由性质均匀的单相（如气态、液态、固态）物质所组成。在不考虑重力影响的情况下，这种单相系统又称为均匀系统。

#### 2. 多相系统

这类热力学系统内的工质相态不尽相同，可以是两相（如锅炉水冷壁中的水以气态和液态共存）或三相共存。

关于热力学系统，还需指出，它是宏观的、有限的，所谓宏观就是指它是从事物的宏观方面来研究问题，注重的是工质的宏观性质，因此，它可以把大量的分子群视为热力学系统，而不能把几个分子看成一个热力学系统，这样会违反宏观统计规律；所谓有限，就是指不能把无限大的宇宙当成热力学系统，否则就只有系统而无外界了。在特殊情况下，有时也可以把系统与外界看成是一个扩大的孤立系。

## 1-2 状态参数

热力学系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状态称为系统的状态。用来描述系统所处状态的一些宏观物理量则称为状态参数。工程热力学上常采用的状态参数有：温度（ $T$ ）、压力（ $p$ ）、比体积（ $v$ ）、比热力学能（ $u$ ）、比焓（ $h$ ）和比熵（ $s$ ）等。若涉及化学反应问题，采用的状态参数还有：化学势（ $\mu$ ）、比自由能（ $f$ ）和比自由焓（ $g$ ）等。这些参数各自从不同的角度说明了系统所处状态的特征。其中压力、温度和比体积三个参数最为常见，它们可以借助于仪表直接或间接测量，因此常称之为基本状态参数。

### 一、状态参数的特征

状态参数单值地取决于状态，也就是说，体系的热力状态一定，描述状态的参数也就一定；若状态发生变化，则至少有一种参数随之变化。这是状态参数的基本特征。这个特性在数学上可以分解为以下两个特征。

#### 1. 积分特性

当系统由初态 1 变化到终态 2 时，任一状态参数  $Z$  的变化等于初、终态下该参数的差值，而与其中经历的路径无关，即

$$\Delta Z = \int_1^2 dZ = Z_2 - Z_1 \quad (1-1)$$

当系统经历一系列状态变化而又回复到起始终态时，其状态参数变化为零，即它的循环积分为零。

$$\oint dZ = 0 \quad (1-2)$$

## 2. 微分特性

如果状态可由状态参数  $X$ 、 $Y$  确定，即  $Z = f(X, Y)$ ，则有

$$dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X dY$$

令 
$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_Y = M, \quad \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_X = N$$

则 
$$dZ = MdX + NdY$$

因为  $dZ$  是全微分，所以

$$\left(\frac{\partial M}{\partial Y}\right)_X = \left(\frac{\partial N}{\partial X}\right)_Y \quad (1-3)$$

式 (1-3) 是全微分的充分必要条件，也是判断任何一个物理量是否是状态参数的充分必要条件。

## 二、基本状态参数

### 1. 温度

简单地说，温度就是物体冷热程度的表征，人们感觉越热，就说温度越高，感觉越冷，就说温度越低。但是这样以人的主观感觉来表征温度是不科学的，因为这不但不利于定量地来表示物体的温度，有时还会导致一些错误的结论。例如，冬天当用手分别摸放在一起的木头和铁块时，则会感到铁块比木头冷，按照上面的说法，应该就是铁块的温度比木头的温度低。但事实上，只要用仪器去测量一下就会发现，它们的温度是一样的。

温度的科学定义是建立在热力学第零定律的基础上的。

若将冷热程度不同的两个系统相互接触，它们之间会发生热量传递。在不受外界影响的条件下，经过足够长的时间，它们将达到共同的冷热程度，而不再进行热量交换，这种情况称之为热平衡。

实验表明：与系统  $C$  同时处于热平衡的系统  $A$  和  $B$ ，它们也彼此处于热平衡。这个定律叫**热平衡定律**，按照 1931 年福勒 (R. H. Fowler) 的建议，此定律又叫作**热力学第零定律**。

根据热力学第零定律，要比较  $A$  和  $B$  的温度无需让它们彼此接触，只要用另一物体  $C$  分别与它们接触就行了。这就是使用温度计测量温度的原理。这个原理指出，温度最基本的性质是：一切互为热平衡的物体具有相同的温度。这句话可以作为温度的定性的定义。另外，需要指出的是温度是一个具有统计意义的物理量，也就是说，温度是大量分子热运动的集体表现，说某一个分子具有多高的温度是没有意义的。

为了进行温度测量，需要有温度的数值表示方法，即需要建立温度的标尺或温标。任何一种温度计都是根据某一温标制成。在日常生活中说体温是  $37^\circ\text{C}$ ，气温是  $20^\circ\text{C}$ ，使用的就是摄氏温标，1742 年，瑞典天文学家摄尔修斯 (A. Celsius, 1701~1744 年) 制定了百分刻度法。他把水的冰点和沸点之间分为 100 个温度间隔；为避免测冰点以下的低温时出现负值，他把水的沸点规定为零点，而把冰点定为  $100^\circ\text{C}$ 。后来接受他的同事的建议才把这种标



值倒过来，这就是现在所用的摄氏温标。

采用不同的测温物质，除了基准点的温度值按规定相同外，其他的温度都有微小差别。建立在热力学第二定律基础上的热力学温标则是一种与测温物质的性质无关的温标。用这种温标确定的温度称之为热力学温度，以符号  $T$  表示，计量单位为开尔文，以符号  $K$  表示。1954 年以后，国际上规定选用纯水的三相点作为标准温度点，并规定这个状态下温度的数值是  $273.16K$ 。1960 年国际计量大会通过决议，规定摄氏温度由热力学温度移动零点来获得，即

$$t = T - 273.15 \quad (1-4)$$

这里还应该提一下，在英、美等国在日常生活和工程技术上还经常使用华氏温标和朗肯温标。其中，华氏温度和摄氏温度之间的关系为

$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t \quad (1-5)$$

为了对上述几种温标有个综合的了解，下面特将它们的基本情况列作一表，以便于大家比较。

表 1-1 四种温标基本情况比较表

比较 温标	单位	符号	固定点的温度				与热力学温度的关系	使用情况
			绝对零度	冰点	三相点	沸点		
热力学温度	K	$T$	0	273.15	273.16	373.15	$T = T$	国际单位
摄氏温度	$^{\circ}C$	$t$	-273.15	0.00	0.01	100.00	$t = T - 273.15$	国际单位
华氏温度	$^{\circ}F$	$t_F$	-459.69	32.00	32.02	212.00	$t_F = 9T/5 - 491.67$	英制单位
朗肯温度	$^{\circ}R$	$T_R$	0	491.69	491.69	671.67	$T_R = 1.8T$	英制单位

## 2. 压力

压力是指沿垂直方向作用在单位面积上的作用力，在物理学中又叫压强。对于容器内的气体工质来说，压力是大量气体分子作不规则运动时对器壁频繁碰击的宏观统计结果。

工程上所采用的压力表都是在特定的环境中测量的。如常见的 U 形管压力计（如图 1-5 所示）或弹簧式压力表（如图 1-6 所示）等，所测出的压力值都受限于环境中的大气压力  $p_b$ ，并不是系统内气体的绝对压力。这里分两种情况：

第一种情况，如图 1-5 (a) 所示，此时绝对压力高于大气压力 ( $p > p_b$ )，压力计指示的数值称为表压力，用  $p_g$  表示。显然

$$p = p_g + p_b \quad (1-6)$$

第二种情况，如图 1-5 (b) 所示，此时绝对压力低于大气压力 ( $p < p_b$ )，压力计指示的读数称为真空，用  $p_v$  表示，显然

$$p = p_b - p_v \quad (1-7)$$

值得强调，不论表压力  $p_g$  或真空  $p_v$ ，其值除与系统内的绝对压力  $p$  相关外，还与测量时外界环境压力  $p_b$  有关，它们是相对的，即使在某一既定的状态下，这时气体的绝对压力虽保持不变，但由于外界环境条件的改变，使得测出的表压力  $p_g$  或真空  $p_v$  亦将发生变化。由此可见，只有绝对压力才是平衡状态系统的状态参数，进行热力计算时，特别是在后面章节查水蒸气的表或焓熵图时，一定要用到绝对压力。