电力生产人员公用类培训教材

应用热工基础

王修彦　张晓东　编

非外借

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

电力生产人员公用类培训教材

应用热工基础

王修彦　张晓东　编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

在提倡建设节约型社会的今天，人们都在追求能量的合理高效利用，学习应用热工基础课是非常有必要的。

本书内容包括基本概念、热力学基本定律、理想气体的性质和热力过程、水蒸气和湿空气、气体和蒸汽的流动、动力装置循环、制冷与热泵循环、传热与换热器、导热、对流换热、热辐射和辐射换热。

本书特别适合能源与动力工程、热工自动化、测控仪表、安全工程等专业学生学习使用，对现场工程技术人员也有一定的指导作用。

图书在版编目（CIP）数据

应用热工基础 / 王修彦，张晓东编 . —北京：中国电力出版社，2018.11
电力生产人员公用类培训教材
ISBN 978-7-5198-2669-7

Ⅰ. ①应… Ⅱ. ①王… ②张… Ⅲ. ①火电厂－热工仪表－技术培训－教材 Ⅳ. ① TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 273075 号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：徐　超（010—63412386）
责任校对：黄　蓓　郝军燕
装帧设计：赵姗姗
责任印制：吴　迪

印　　刷：北京雁林吉兆印刷有限公司
版　　次：2018 年 12 月第一版
印　　次：2018 年 12 月北京第一次印刷
开　　本：880 毫米 ×1230 毫米　32 开本
印　　张：10.375
字　　数：273 千字
印　　数：0001—1500 册
定　　价：39.80 元

版 权 专 有　侵 权 必 究
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

前　言

热现象是自然界的最普遍的物理现象，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，学习应用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作用的。

在长期的教学过程中，编者积累了较丰富的教学经验。在多次给来自现场的工程技术人员做培训的过程中，从他们身上也学到了一些实际知识。因此，本书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。本书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。

本书由华北电力大学王修彦副教授、张晓东副教授合编。王修彦编写前 7 章，张晓东编写后 4 章。

由于编者水平有限，难免有疏漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编　者

2018 年 8 月

目 录

前言
第一章 基本概念 …… 1
第一节 工质和热力系统 …… 1
第二节 状态参数 …… 5
第三节 平衡状态 …… 10
第四节 热力过程 …… 12
第五节 功和热量 …… 14
第六节 热力循环 …… 19
复习题 …… 21
第二章 热力学基本定律 …… 25
第一节 热力学第一定律的实质 …… 25
第二节 热力学能 …… 26
第三节 闭口系统能量方程 …… 27
第四节 焓 …… 28
第五节 稳定流动能量方程及其应用 …… 29
第六节 热力学第二定律 …… 35
第七节 卡诺循环与卡诺定理 …… 37
第八节 熵与熵增原理 …… 42
第九节 㶲分析方法简介 …… 47
复习题 …… 49
第三章 理想气体的性质和热力过程 …… 55
第一节 理想气体状态方程 …… 55
第二节 理想气体的比热容 …… 57

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第三节　理想气体的热力学能、焓、熵 …… 60
第四节　理想气体混合物 …… 64
第五节　理想气体的热力过程 …… 68
第六节　气体的压缩 …… 77
复习题 …… 86
第四章　水蒸气和湿空气 …… 89
第一节　水汽化与沸腾 …… 89
第二节　水的定压汽化过程 …… 90
第三节　水蒸气的状态参数和水蒸气表 …… 94
第四节　蒸汽焓熵图及其应用 …… 101
第五节　湿空气的性质 …… 104
第六节　湿空气的焓-湿图 …… 110
第七节　湿空气的热力过程 …… 112
复习题 …… 117
第五章　气体和蒸汽的流动 …… 123
第一节　一维稳定流动的基本方程式 …… 123
第二节　促进流动改变的条件 …… 126
第三节　定熵滞止参数 …… 127
第四节　喷管的计算 …… 130
第五节　有摩擦阻力的绝热流动 …… 134
复习题 …… 137
第六章　动力装置循环 …… 141
第一节　基本的蒸汽动力循环——朗肯循环 …… 141
第二节　再热循环 …… 149
第三节　回热循环 …… 152
第四节　热电联产循环 …… 156
第五节　燃气轮机装置循环 …… 161
复习题 …… 171

第七章 制冷与热泵循环 …… 175
第一节 概述 …… 175
第二节 压缩空气制冷循环 …… 176
第三节 压缩蒸汽制冷循环 …… 179
第四节 吸收式制冷循环 …… 182
第五节 热泵 …… 184
复习题 …… 187
第八章 传热与换热器 …… 190
第一节 传热的基本概念 …… 190
第二节 传热过程 …… 195
第三节 换热器 …… 203
复习题 …… 211
第九章 导热 …… 215
第一节 导热基本定律 …… 216
第二节 通过平壁和圆筒壁的一维稳态导热 …… 220
第三节 非稳态导热 …… 230
复习题 …… 236
第十章 对流换热 …… 240
第一节 基本概念 …… 241
第二节 流体无相变时的对流换热 …… 249
第三节 流体有相变时的对流换热 …… 253
复习题 …… 259
第十一章 热辐射和辐射换热 …… 262
第一节 热辐射的基本概念 …… 262
第二节 黑体辐射的基本定律 …… 268
第三节 实际物体的表面辐射特性 …… 271
第四节 辐射角系数 …… 277
第五节 漫灰表面之间辐射换热的计算 …… 283

第六节　气体辐射的特点 …… 294
复习题 …… 295
附录 A　饱和水和水蒸气的热力性质（按温度排列） …… 298
附录 B　饱和水和水蒸气的热力性质（按压力排列） …… 301
附录 C　未饱和水和过热蒸汽热力性质表 …… 303
附录 D　几种材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率 … 313
附录 E　标准大气压下干空气的物性参数 …… 315
附录 F　饱和水的热物理性质 …… 316
附录 G　几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系 …… 318
附录 H　湿空气的焓湿图 …… 319
附录 I　氨的压焓图 …… 320
附录 J　R134a 的压焓图 …… 321
参考文献 …… 322

第一章

基本概念

第一节　工质和热力系统

实现能量转化的媒介物质称为工质。热能和机械能的相互转化是通过工质的一系列状态变化来实现的。例如，在燃煤火力发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，在燃气-蒸汽联合循环发电厂中的工质是燃气和水蒸气，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，在制冷工程中它又专门称为制冷剂。

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。

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系统，简称热力系或系统。系统以外的部分称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界，热力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。以火力发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，如图 1-1（a）所示，就可以把锅炉作为研究对象，把它从周围物体分隔开来，锅炉就是一个热力系统。如果感兴趣的是汽轮机中做功量和输入蒸汽的关系，如图 1-1（b）所示，就可以选取汽轮机作为热力系统。假如为了研究加入锅炉的燃料

量和汽轮机输出功的关系，如图 1-1（c）所示，就可以把整个蒸汽动力装置划作一个热力系统。

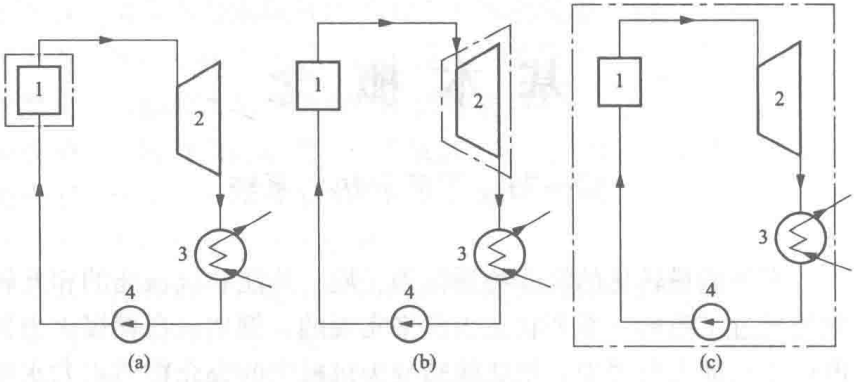

图 1-1 蒸汽动力系统

（a）以锅炉为热力系统；（b）以汽轮机为热力系统；

（c）以整个蒸汽动力装置为热力系统

1—锅炉；2—汽轮机；3—凝汽器；4—给水泵

热力系统分类如下。

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。

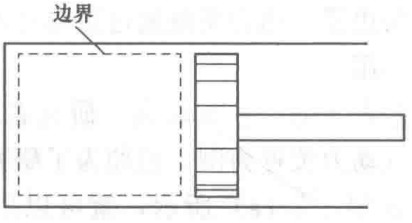

图 1-2 闭口系统

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。

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，看起来与图 1-3 是一样的，但此刻，关注的是某一小气团所组成的热力系，假想它的外面有一看不见的膜将它包裹着，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，这个热力系统内气体工质与外界并没有物质交换，因此这个热力系统就是一个闭口系统。

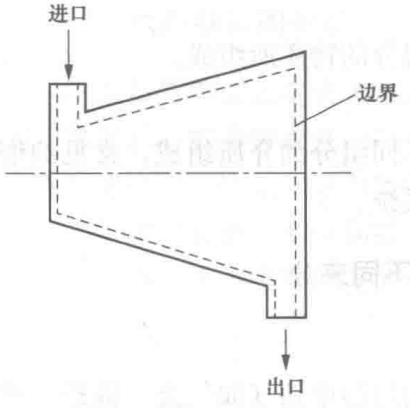

图 1-3 开口系统

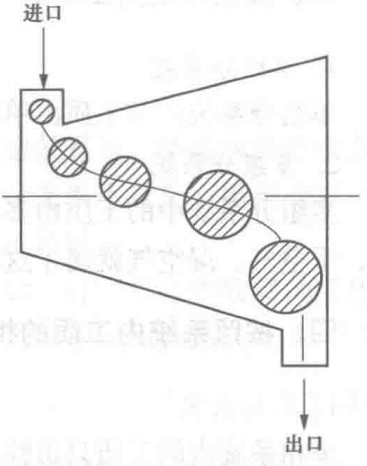

图 1-4 看似开口系统的闭口系统

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

非孤立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。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2. 孤立系统

孤立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

绝热系统在分界面上与外界不存在热量交换，但可以有功和物质交换。例如，在分析火力发电厂时可以把汽轮机看成是绝热系统，因为汽轮机外面有保温层，同时蒸汽在汽轮机内流动速度非常快，其散热可以忽略。

三、按照系统内工质的组成特征来分

1. 单组分系统

单组分系统内的工质由单纯组分的物质所组成。

2. 多组分系统

多组分系统中的工质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

单相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

多相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。

热力系统是宏观的、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系统，而不能把几个分子看成一个热力系统；所谓有限，就是指不能把无限大的宇宙当成热力系统，否则就只有系统而无外界了。

第二节 状 态 参 数

热力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。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3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。

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

$$\Delta Z=\int_1^2 \mathrm{d}Z=\int_{1\to a\to 2} \mathrm{d}Z=\int_{1\to b\to 2} \mathrm{d}Z=Z_2-Z_1 \tag{1-1}$$

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，则

$$\oint \mathrm{d}Z=0 \tag{1-2}$$

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。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，这种情况称为热平衡。

如图 1-5 所示，与系统 B 同时处于热平衡的系统 A 和 C，它们也彼此处于热平衡。这个定律称为热平衡定律，又称为热力学第零定律。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。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。

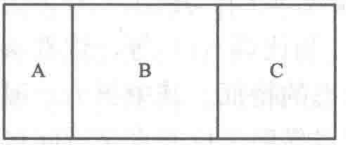

图 1-5　热力学第零定律

根据热力学第零定律，要比较物体 A 和 C 的温度无须让它们彼此接触，只要用另一物体 B 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。如图 1-6 所示，用温度计测量液体的温度，把温度计放入液体中足够长时间，水银柱稳定住了，这时就可以读出液体温度，其中温度计玻璃壁相当于物体 B，被测液体相当于物体 A，水银柱相当于物体 C。

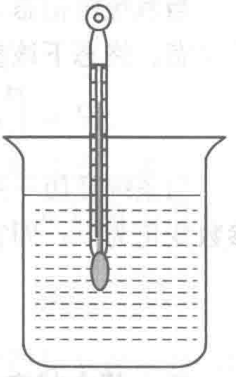
图 1-6　用温度计测量液体温度

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的。在日常生活中说体温是 38℃，气温是 25℃，使用的就是摄氏温标，它是瑞典天文学家摄尔修斯（A. Celsius，1701—1744 年）提出来的。

建立在热力学第二定律基础上的热力学绝对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为 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

$$t = T - 273.15 \tag{1-3}$$

英、美等国在日常生活和工程技术上还经常使用华氏温标，华氏温度和摄氏温度之间的关系为

$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t \tag{1-4}$$

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表 1-1，以便于大家比较。

表 1-1　　三种温标基本情况比较表

项目	单位	符号	固定点的温度				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	国际单位
摄氏温度	℃	t	−273.15	0.00	0.01	100.00	国际单位
华氏温度	°F	t_F	−459.69	32.00	32.02	212.00	英制单位

【例 1-1】 测得某容器内气体工质的温度为 200℃，求该气体工质的热力学温度。

解： 该气体工质的热力学温度为

$$T = t + 271.15 = 200 + 273.15 = 473.15(\mathrm{K})$$

【例 1-2】 张三用华氏温度计测得某天最高温度为 82°F，求该温度对应多少摄氏度？

解： 根据式（1-4），则

$$82 = 32 + \frac{9}{5}t$$

解之得

$$t = 27.8℃$$

2. 压力

压力是指沿垂直方向上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1-7所示）或弹簧式压力表等（如图1-8所示）等，所测出的压力值都以环境中的大气压力 p_b 为基础的相对值，并不是系统内气体的绝对压力。这里分两种情况：

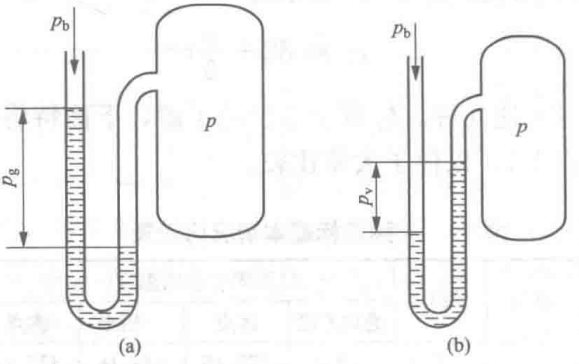

图1-7　U形管压力计

（a）正压系统；（b）负压系统

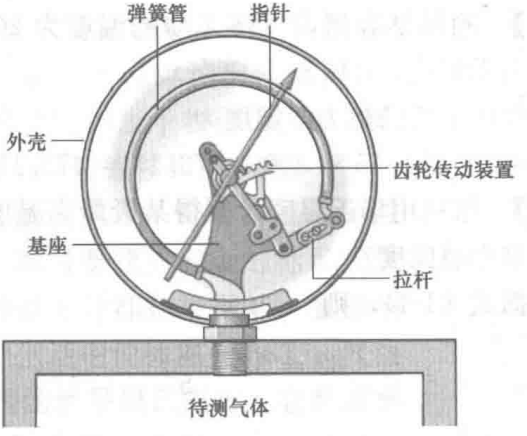

图1-8　弹簧式压力表

第一种情况，如图1-7（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。显然容器内的绝对压力为

$$p = p_b + p_g \tag{1-5}$$

第二种情况，如图 1-7（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度，用 p_v 表示，显然容器内的绝对压力为

$$p = p_b - p_v \tag{1-6}$$

在火力发电厂中，有许多设备处于正压状态，如锅炉汽包、给水管道、水冷壁管道、油系统、高压加热器等，也有一些设备处于负压下工作，如锅炉炉膛、凝汽器、凝结水管道、煤粉系统等。

不论表压力 p_g 或真空度 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。在某一既定的状态下，这时气体的绝对压力虽然保持不变，但由于外界环境条件的改变，使得测出的表压力 p_g 或真空度 p_v 也将发生变化。只有绝对压力才是平衡状态系统的状态参数，进行热力计算时一定要用到绝对压力。

在法定计量单位中，压力单位的名称是帕斯卡，简称帕，符号是 Pa，它的定义是 $1m^2$ 面积上垂直作用 1N 的力产生的压力为 1Pa，即

$$1Pa=1N/m^2 \tag{1-7}$$

帕这个单位太小，工程上常用千帕（kPa）和兆帕（MPa）作压力单位。有时也有用液柱高度，如毫米水柱（mmH_2O）或毫米汞柱（mmHg）来表示压力，其为惯用的非法定单位。标准大气压（atm）是纬度 45°海平面上的常年平均大气压。在旧的单位体制中，还有用巴（bar）和工程大气压（at）的，它们在我国的法定计量单位中已废除。这些单位与 Pa 的关系为

$1kPa=10^3Pa$

$1MPa=10^6Pa=10^3kPa$

$1mmH_2O=9.81Pa$

$1mmHg=133.3Pa$

$1atm=760mmHg=1.01325\times10^5Pa$

$1bar=10^5Pa$

$1at=1kgf/cm^2=0.981\times10^5Pa$

需要全本请访问 www.ertongbook.com