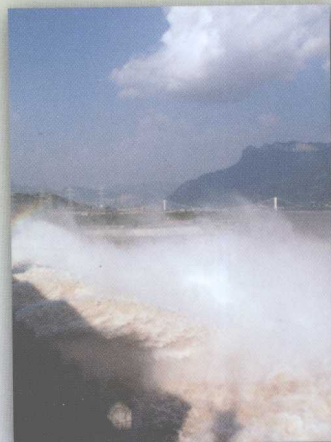
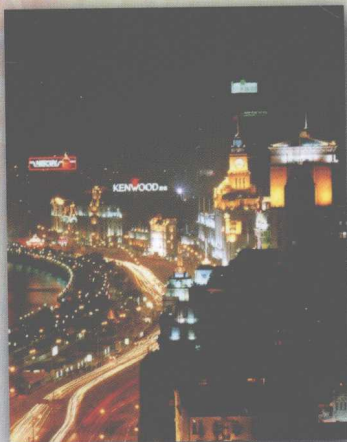
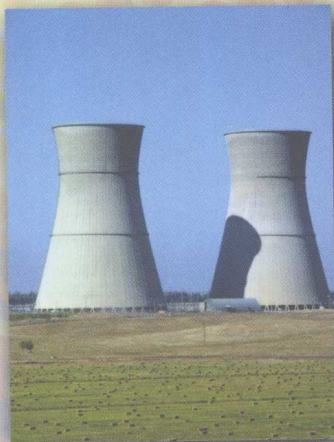




高等学校“十一五”精品规划教材

发电厂动力部分

季鹏伟 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校“十一五”精品规划教材

发电厂动力部分

季鹏伟 主编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共有七章，第一、二、三章阐述了火力发电的基本知识，火电厂主要动力设备的工作原理、结构，主要的热力系统以及运行方面的知识；第四、五、六章内容主要介绍水力发电的基本原理和基本知识，水轮机的工作原理和结构以及水电站的辅助系统；第七章讲述了核电站的工作原理及主要设备。

本书可作为高等院校非热能与动力工程专业的教学用书，可供热能与动力工程专业作为实习教材，也可供发电厂相关技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂动力部分/季鹏伟主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-5315-6

I. 发… II. 季… III. 发电厂—动力系统—高等学校—教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 019947 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 发电厂动力部分
作 者	季鹏伟 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 11.75 印张 279 千字
版 次	2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	22.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书为高等学校“十一五”精品规划教材。全书内容分为火力发电厂动力部分、水力发电厂动力部分和原子能发电厂动力部分三部分，分别阐述了各发电厂动力部分的基本原理和基础知识，主要动力设备的工作原理、结构，系统布置和运行方式。内容包括热工学理论基础、锅炉设备、汽轮机设备、水力学基础、水能利用、水轮机、原子能发电厂动力设备。在内容编排上，紧密联系我国电力工业发展的实际和发电厂的生产过程，并注意吸收国内外的最新技术成果，以适应我国电力工业中、长期发展目标的需要。本书内容简明扼要，由浅入深，注重结构，文字通俗易懂。

本书可作为高等院校非热能与动力工程专业的教学用书，可供热能与动力工程专业作为实习教材，也可供发电厂相关技术人员参考使用。

本书由季鹏伟副教授主编并统稿。季鹏伟副教授编写绪论、第一章、第二章和第三章，王兴国副教授编写第四章，商福民副教授编写第五章和第六章，贾振国副教授编写第七章。全书由长春工程学院史振声教授负责审稿。在本书的编写过程中，部分兄弟院校以及发电厂等生产单位给予了大量宝贵的意见和建议，在此一并致以谢意。

由于编者水平所限，难免存在缺点和错误，恳请广大师生和读者给予批评和指正。

编 者

2008年1月

目 录

前言

绪论	1
第一章 热工学理论基础	5
第一节 热力学基本概念	5
第二节 热力学基本定律	8
第三节 水蒸气及蒸汽动力循环	14
第四节 传热学基本知识	22
第二章 锅炉设备	34
第一节 锅炉设备概述	34
第二节 燃料	37
第三节 煤粉制备及其设备	43
第四节 锅炉本体	54
第五节 锅炉的主要辅助设备	74
第三章 汽轮机设备	77
第一节 汽轮机设备概述	77
第二节 汽轮机级的工作原理	80
第三节 汽轮机本体	85
第四节 汽轮机的调节保护系统	102
第五节 汽轮机的凝汽设备及其系统	115
第六节 热力系统及其设备	117
第七节 火力发电厂辅助生产系统	125
第四章 水力学基础	127
第一节 液体的物理性质	127
第二节 水静力学	128
第三节 水动力学	131
第五章 水能利用	135
第一节 概述	135
第二节 水能资源的开发方式	136

第三节	径流调节	139
第四节	水电站的主要水工建筑物	141
第六章	水轮机	151
第一节	水轮机的分类及型号	151
第二节	水轮机的构造	156
第三节	水轮机的工作原理	162
第四节	水轮机调节	165
第五节	水电站的辅助系统	167
第七章	核能发电厂动力设备	170
第一节	核能发电基本知识	170
第二节	压水堆核电厂	172
第三节	核电厂的安全性和三废处理	177
参考文献	181

绪 论

能源是国民经济发展的物质基础。能源的开发和利用的程度是社会生产发展的一个重要标志。

以原始状态存在于自然界中，无需加工或转换即可直接用于供热或提供动力的能源称为一次能源，如风能、水能、太阳能、地热能、潮汐能以及燃料的化学能等。通过消耗一次能源而得到的能源称为二次能源，如电能、热能等。电能是一种洁净能源，可方便地转化为其他形式的能源，如机械能、热能、光能、声能等；电能便于输送，且电能的生产、输送和使用能够得到有效而精确的控制。因此，电能已成为应用最广泛的能源，电力工业亦成为国民经济的先行行业。电力工业的发展速度必须高于国民经济的发展速度，才能保证国民经济持续、稳步、健康地发展。

发电厂是利用各种一次能源如燃料、水能、原子能、风能等转换成电能的工厂。根据一次能源的形式，发电厂可分为火力发电厂、水力发电厂、核电厂、潮汐发电厂、风力发电厂等。目前我国还是以火力发电及水力发电为主。

2006年底，全国发电装机容量达到62200万kW。其中，水电达到12857万kW，约占总容量的20.67%；火电达到48405万kW，约占总容量的78.2%。从电力生产情况看，全国发电量达到28344亿kW·h。其中，水电发电量4167亿kW·h，约占全部发电量的14.70%；火电发电量23573亿kW·h，约占全部发电量的83.17%；核电发电量543亿kW·h，约占全部发电量的1.92%。

一、火力发电的生产过程

火力发电厂是用煤、石油、天然气作燃料，在锅炉设备中通过燃烧和传热，将燃料的化学能转换为水蒸气的热能，过热蒸汽在汽轮机设备内将热能转换为机械能，汽轮机带动发电机转动，最后将机械能转换为电能。

火力发电厂根据供应能量的形式可分为凝汽式发电厂和热电厂。凝汽式电厂只供应电能，热电厂既供应电能又供应热能。两者供应的能量虽不同，但其生产过程基本相同。现以凝汽式燃煤电厂为例来说明其生产过程，如图0-1所示。

原煤通过水路、铁路等运到电厂后，利用输煤皮带经过破碎、除铁处理后送至锅炉房的原煤斗。原煤经给煤机送至磨煤机，同时将热风送入磨煤机作干燥、输送煤粉之用，原煤在磨煤机中被磨制成煤粉，经分离后，合格的煤粉与干燥剂一起被排粉风机抽出，经喷燃器送入炉膛燃烧。

送风机将取自于环境中的空气送入空气预热器中预热，预热后热空气分两路：一路送至磨煤机；另一路由喷燃器直接喷入炉膛助燃。

燃料燃烧生成的高温烟气在引风机的抽吸下，依次经过过热器、再热器、省煤器、空气预热器，降低温度后，进入除尘器进行烟气除尘，净化后的烟气经引风机通过烟囱排入

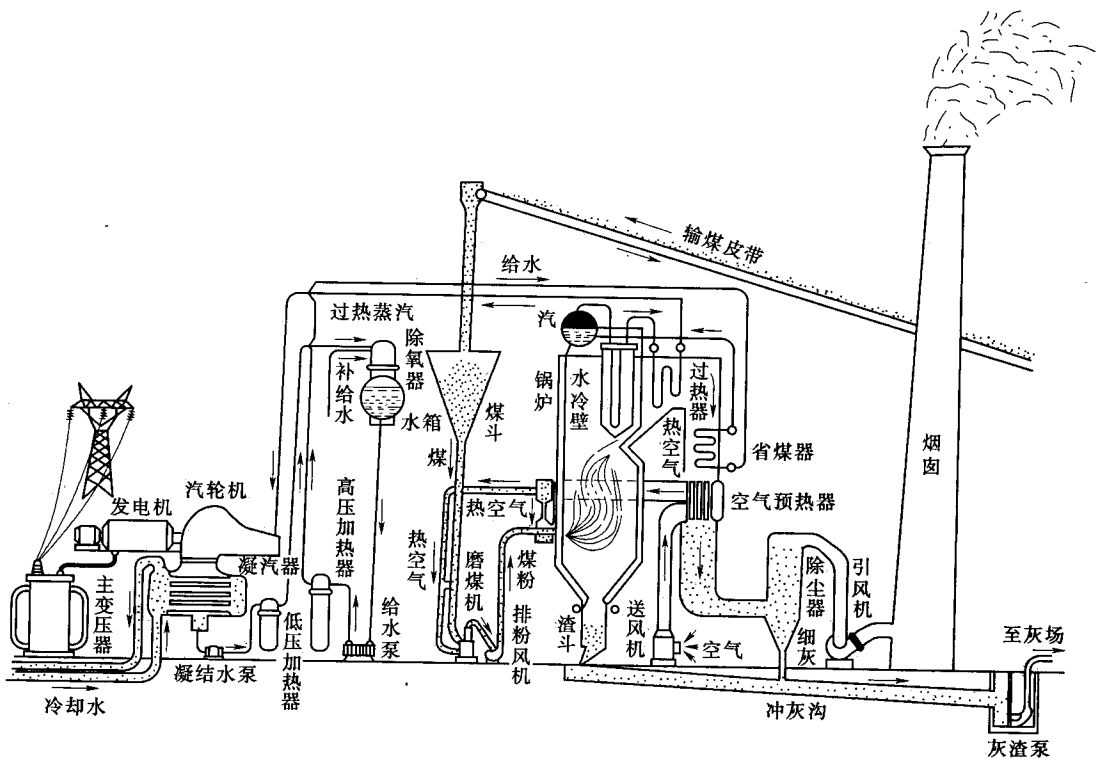


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图

大气。

燃料燃烧形成的由炉膛底部排除的灰渣以及由除尘器捕捉下来的飞灰，通常是利用水通过灰沟将其冲入灰渣泵房，再经灰渣泵送往贮灰场。

燃料在炉膛中燃烧释放出的热量被水冷壁中的水吸收，水吸热后部分变成蒸汽，汽水混合物上升回到汽包，经分离后，饱和蒸汽被引入过热器中继续加热成过热蒸汽，过热蒸汽经主蒸汽管道进入汽轮机绝热膨胀做功，将蒸汽的热能转换为旋转机械能，发电机在汽轮机的带动下，将机械能转换为电能。

在汽轮机做完功后的乏汽排入凝汽器，在凝汽器内凝结成水，经加热、除氧后由给水泵升压后再送入锅炉。

综上所述，燃煤火力发电厂的生产过程实际上是把燃料所蕴藏的化学能转变为电能的过程。其动力部分是由制粉系统设备、锅炉设备、汽轮机设备、凝汽器设备和给水设备等组成。

与水电站和其他类型的电厂相比，火电厂有以下特点：

- (1) 火电厂布局灵活，装机容量的大小可按需要决定。
- (2) 火电厂建造工期短，一般为水电厂的一半甚至更短。一次性建造投资少，仅为水电站的一半左右。
- (3) 火电厂耗煤量大，加上运煤费用和大量用水，其生产成本比水力发电要高出 3~

4 倍。

(4) 火电厂动力设备繁多，发电机组控制操作复杂，厂用电量和运行人员都多于水电站，运行费用高。

(5) 汽轮机开、停机过程时间长，耗资大，不宜作为调峰电源用。

(6) 火电厂对空气和环境造成的污染大。

二、水力发电的生产过程

水电站是利用自然界中江河湖泊的水所蕴藏的能量来生产电能的发电厂。其生产过程是有压水流通过水轮机，将水能转变为旋转机械能，水轮机又带动水轮发电机转动，再将旋转机械能转变为电能，在水轮机中做完功后的水流经尾水管排入下游，其生产流程如图 0-2 正向所示。水轮机和水轮发电机合起来称为水轮发电机组，简称机组。

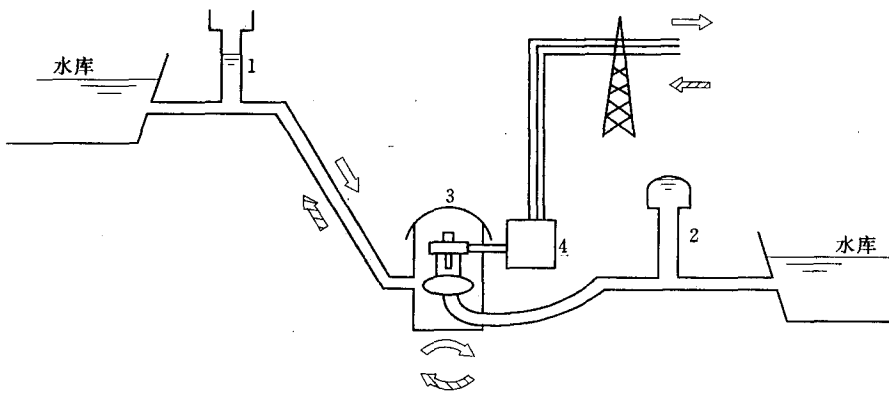


图 0-2 水力发电厂与抽水蓄能电厂示意图

1、2—调压井；3—水电站；4—变压器

水力发电的主要特点是：

(1) 发电成本低、效率高。水能是再生性能源，不像火电厂的煤和石油。因不用燃料，也省去了开采、运输、加工等多个环节，运行人员少，厂用电率低，发电成本仅是同容量火电厂的 1/10 或更低。

(2) 可综合利用水资源。除发电外，还有防洪、灌溉、航运、供水、养殖及旅游等多方面综合效益，并且可以因地制宜，将一条河流分成若干河段，分别修建水利枢纽，实行梯级开发。

(3) 运行灵活。由于水电站设备简单，机组启动快，运行操作灵活，易于实现自动化。水电站适合于承担系统的调峰、调频和事故备用（容量）的任务。

(4) 水能可储蓄和调节。电能的生产是发、输、用同时完成的，不能大量储存，而水资源则可借助水库进行调节和储蓄，而且可建造抽水蓄能发电站，扩大利用水的能源。

(5) 水力发电不污染环境。水力发电不产生烟气和废渣，不会造成环境污染。相反，大水库可调节空气的温度和湿度，改善自然生态，往往成为旅游和疗养胜地。

(6) 水电站建设投资大、工期长。修建水电站的施工工程量大，需修建拦河大坝，改建道路，而且常常淹没土地，需要移民搬迁及远距离输电等，工程量、工期和投资都远比

火电厂大。

(7) 水电站建设受自然条件限制。水电站的建设和生产都受河流的地形、水量及季节气象条件限制，因此发电量也受到水文气象条件的制约。

三、核能发电的生产过程

将原子核裂变释放出的能量转变成电能的电厂为核能发电厂。核能是指原子核裂变所释放出的巨大能量，可分为两种：一种是重金属元素如铀、钚等的原子核发生裂变放出巨大能量，称为裂变反应；另一种是轻元素，如氢的同位素氘和氚等的原子核聚合成较重的原子核（如氦），并放出巨大的能量，称为聚变反应。原子能电厂即核电厂由两部分组成，一部分是利用核能生产蒸汽的核岛，它包括核反应堆和一回路系统，核燃料在反应堆中进行链式裂变产生热能，一回路中冷却水吸收裂变产生的热能后流出反应堆，进入蒸汽发生器将热量传给二回路中的水，使之变成蒸汽；另一部分是利用蒸汽的热能转换成电能的常规岛，它包括汽轮发电机组及其系统，与火电厂中的汽轮发电机组大同小异。压水堆核电站的简要流程如图 0-3 所示。

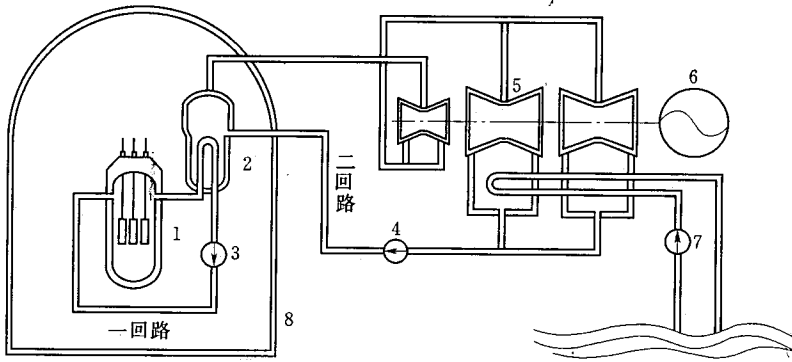


图 0-3 压水堆核电站简要流程图

- 1—反应堆压力容器；2—蒸汽发生器；3—主冷却剂泵；4—给水泵；
5—汽轮机；6—发电机；7—循环水泵；8—安全壳

核反应堆相当于火电厂的锅炉炉体，主要由核燃料、减速剂、冷却系统、控制调节系统、危急保安系统和防护屏蔽层等组成。由于反应堆的功率不同以及所用慢化剂和冷却剂的参数不同等，核电厂反应堆的类型、结构和运行特点也各不相同。

核电厂尽管一次性建造投资大，但发电成本低且无烟尘污染。放射性方面，由于处理十分严格，对人类无影响。

核能储量远比化学能大， $1\text{kg } ^{235}\text{U}$ 裂变释放的能量，相当于 2700t 标准煤完全燃烧所放出的热量，所以大大减少了燃料的运输工作量。

第一章 热工学理论基础

第一节 热力学基本概念

一、热力系统与工质

1. 热力系统

分析任何现象时，首先应明确所研究的对象，分析热现象时也不例外。热力学中，常把分析的对象从周围物体中分割出来，研究它与周围物体之间的能量和物质的交换。这种被人为分割出来作为热力学分析对象的有限物质系统称为热力系统，简称热力系或系统。热力系以外的物质统称为外界。系统与外界交界面称为边界。边界可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是移动的。图 1-1 (a) 所示的气缸活塞机构，若把虚线内包围的气体取作热力系统，则其边界就是真实的，且其中与活塞接触的边界是移动的；图 1-1 (b) 所示的汽轮机，当取汽轮机中的工质（蒸汽）作为热力系统时，工质和汽轮机之间的边界是真实的，而进口前后和出口前后的工质之间的边界是假想的。

根据热力系统和外界之间的能量和物质交换情况，热力系统可分为几种不同的类型。

闭口系——热力系统和外界只有能量交换而无物质交换，即系统内的质量保持恒定不变，所以闭口系统又称为控制质量（Control Mass，简写 CM）。

开口系——热力系统和外界不仅有能量交换而且有物质交换。开口系统中的能量和质量都可以变化，但这种变化通常是在某一划定的空间范围内进行的，所以开口系统又称为控制容积（Control Volume，简写为 CV），或控制体。

绝热系——热力系统和外界之间无热量交换。

孤立系——热力系统和外界既无能量交换又无物质交换。孤立系统的一切相互作用都发生在系统内部。

简单系——热力系统和外界只存在热量及一种形式准静态功的交换。

2. 工质

用来实现能量转换的媒介物称为工质。如在汽轮机中，借助水蒸气的膨胀完成了热能与机械能的转换，水蒸气即为工质。

原则上，气、液、固三态物质都可作为工质。但是，工程热力学研究的热能与机械能

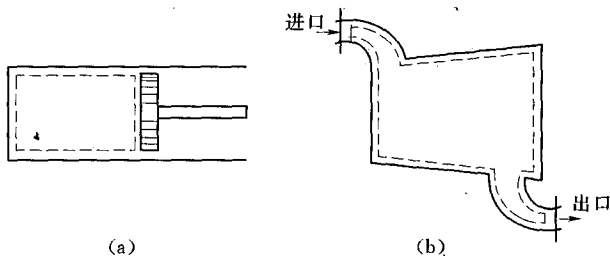


图 1-1 系统和边界
(a) 气缸活塞机构；(b) 汽轮机

的相互转换是通过工质的体积变化来实现的，而对体积变化敏感的是气（汽）态物质。

二、平衡状态

热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的热力学状态，简称状态。热力系统可能呈现各种不同的状态，其中具有特别重要意义的是平衡状态。所谓平衡状态是指在没有任何外界影响（重力场除外）的条件下，热力系统的宏观性质不随时间变化的状态。

如果组成热力系统的各部分之间没有热量的传递，系统就处于热平衡。因此，温差的消失是系统建立热平衡的必要条件。若热力系统的各部分之间没有相对位移，系统就处于力的平衡。因此，力差的消失是系统建立力平衡的必要条件。

三、状态参数

用来描述系统状态的宏观物理量称为状态参数。通常系统是由工质组成，因此描述系统在某瞬间所呈现的宏观物理状况的状态参数，也就是工质的状态参数。状态参数是热力系统状态的单值函数，它的值取决于给定的状态，而与如何达到这一状态的途径无关。状态参数的这一特性表现在数学上是点函数，其微元差是全微分，而全微分沿闭合路线的积分等于零。研究热力过程时，常用的状态参数有压力 p 、温度 T 、体积 V 、热力学能 U 、焓 H 和熵 S 。其中压力、温度及体积可直接用仪器测量，使用最多，称为基本状态参数。其余状态参数可根据基本状态参数间接算得。压力和温度这两个参数与系统质量的多少无关，称为强度量；体积、热力学能、焓和熵等与系统质量成正比，具有可加性，称为广延量。单位质量的广延量称为比参数，例如比体积、比热力学能、比焓和比熵。比参数具有强度量的性质，不具有可加性。通常，热力系统的广延参数用大写字母表示，其比参数用小写字母表示。

1. 比体积

单位质量的物质所占有的体积称为比体积，即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-1)$$

式中 v ——比体积， m^3/kg ；

V ——物质的体积， m^3 ；

m ——物质的质量， kg 。

单位体积物质的质量称为密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——密度， kg/m^3 。

不难看到，比体积与密度互为倒数，即

$$v\rho = 1 \quad (1-3)$$

因此它们不是互相独立的参数，可以任意选用其中之一，工程热力学中通常选用 v 作为独立参数。

2. 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压力（即压强），用 p 表示，国际制单位为帕（Pa）；即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

式中 F ——作用于面积 A 上的垂直作用力, N;
 A ——作用面积, m^2 。

工质的真实压力常称为绝对压力, 用 p 表示; 当绝对压力高于大气压力时, 压力计指示的数值称为表压力 (Gage Pressure), 用 p_g 表示; 当绝对压力低于大气压力时, 压力计指示的数值称为真空度 (Vacuum Pressure), 用 p_v 表示。绝对压力 p 、表压力 p_g 、真空度 p_v 和大气压力 p_b 的关系如图 1-2 所示。

3. 温度

温度是物体冷热程度的标志。温度是热平衡的判据。一切处于热平衡的系统其温度值均相等。温度的数值表示法称为温标。以前的摄氏温标规定标准大气压力下纯水的冰点温度和沸点为基准点, 并规定冰点温度为 0°C , 沸点温度为 100°C 。而其他温度的数值由作为温度标志的物理量的线性函数来确定。摄氏温标用符号 t 表示, 单位为摄氏度, 以符号 $^\circ\text{C}$ 表示。采用不同的测温物质, 或者采用同种测温物质的不同测温性质所建立的温标, 除了

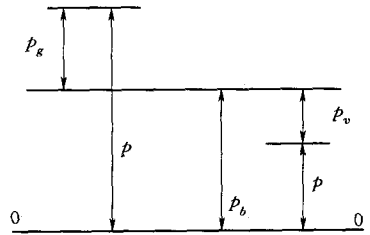


图 1-2 绝对压力 p 、表压力 p_g 、真空度 p_v 和大气压力 p_b 间的关系

冰点和沸点外, 其他的温度值都有微小差异。国际上规定热力学温标作为测量温度的最基本温标。热力学温标用符号 T 表示, 单位为开 [尔文], 以符号 K 表示。热力学温标选用水的汽、液、固三相平衡共存的状态点——三相点为基准点, 并规定它的温度为 273.16K 。因此, 热力学温度的每单位开尔文是水的三相点温度的 $1/273.16$ 。摄氏温度与热力学温度之间的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (1-5)$$

四、准平衡过程与可逆过程

热力系统从一个平衡状态连续经历一系列平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态的过程称为准平衡过程 (或准静态过程)。准平衡过程是一种理想化的过程。实现准平衡过程的条件是一切不平衡势差无限小。由于实际过程都是在有限势差的作用下进行的, 因而都是不平衡过程。但是, 如果系统某一个状态参数变化所经历的时间比系统恢复平衡所经历的时间长, 也就是说系统有足够的时间恢复平衡, 这样的过程就可近似地看成准平衡过程。准平衡过程可以利用系统的状态参数进行描写和分析, 而且可以在状态参数坐标图上用一条连续的曲线表示。

系统经历一个过程后, 如令过程逆行能使系统与外界同时恢复到初始状态而不留下任何痕迹, 则此过程称为可逆过程。可逆过程实现的充要条件是:

- (1) 过程是准平衡过程。
- (2) 过程中不存在耗散效应。

实际热力设备中所进行的一切热力过程, 都或多或少地存在着各种不可逆因素, 因此实际过程都是不可逆的。研究热力过程就是要尽量设法减少不可逆因素, 使其尽可能地接近可逆过程。可逆过程是一切实际过程的理想化极限模型, 是一切热力设备内过程力求接

近的目标。

五、热力循环

工质从初始状态出发, 经历一系列状态变化后又回到初态的热力过程称为热力循环, 简称循环。

全部由可逆过程组成的循环称为可逆循环, 含有不可逆过程的循环称为不可逆循环。

按循环目的分, 有正向循环和逆向循环。将热能转化为机械能的循环叫正向循环, 它使外界得到功, 正向循环也叫热动力循环; 将热量从低温热源传给高温热源的循环叫逆向循环, 一般来讲逆向循环必然消耗外功。逆向循环主要应用于制冷装置和热泵。

循环中能量利用的经济性是指通过循环所得收益与所付出代价之比。对于正向循环, 这一指标是热效率 η , 即

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} \quad (1-6)$$

式中 η ——循环的热效率;

W_{net} ——正向循环的循环功, kJ;

Q_H ——正向循环的吸热量, kJ。

第二节 热力学基本定律

一、热力学第一定律

(一) 热力学第一定律的实质

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热现象中的应用。在工程热力学中, 热力学第一定律可表述为: 热能可以转换为功, 功也可以转换为热能, 一定量的热能消失时, 必产生一定量的功, 消耗一定量的功时必出现与之对应的一定量的热。

热力学第一定律也可表述为: 第一类永动机是不可能制造成功的。

(二) 热力学能和总能

热力学能是指组成热力系统的大量微观粒子本身所具有的能量, 它包括内动能、内位能及维持一定分子结构的化学能和原子核内部的原子能等。在无化学反应及原子核反应的过程中, 化学能、原子核能都不变化, 可以不考虑, 因此热力学能的变化只是内动能和内位能的变化。由于热运动而具有的内动能是温度的函数; 由于分子间相互的作用力而具有的内位能决定于气体的比体积和温度。因此, 热力学能是状态参数, 即 $u = f(T, v)$ 。

我国法定计量单位中热力学能的单位是焦耳, 用符号 J 表示。热力学能用 U 表示, 单位质量工质所具有的热力学能称为比热力学能, 用 u 表示, 单位为 J/kg。

除热力学能外, 热力系统还由于其宏观运动速度而具有的宏观动能 E_k 以及其在重力场中所处的位置而具有的宏观势能 E_p 。因此, 热力系统的总能量为

$$E = U + E_k + E_p = U + \frac{1}{2}mc_f^2 + mgz \quad (1-7)$$

式中 m ——热力系统中工质的质量, kg;

c_f ——热力系统相对于某外部坐标系具有的宏观速度, m/s;

z ——热力系统相对于某外部坐标系具有的高度， m 。

对于单位质量工质而言

$$e = u + \frac{1}{2}c_f^2 + gz \quad (1-8)$$

(三) 焓

在有关热工计算中时常有 $U + pV$ 出现，为了简化公式和简化计算，把它定义为焓，用符号 H 表示，即

$$H = U + pV \quad (1-9)$$

单位质量工质的焓称为比焓，用 h 表示，即

$$h = u + pv \quad (1-10)$$

(四) 推动功

因工质在开口系统中流动而传递的功称为推动功。如图 1-3 所示，质量为 m 的工质，在压力 p_1 的作用下，位移 l 进入系统，则推动功为

$$W_f = p_1 A l$$

式中 A ——截面积。

所以

$$W_f = p_1 V = p_1 v_1 m$$

若 1kg 工质进入系统，则外界所做的推动功为

$$W_f = p_1 v_1 \quad (1-11)$$

同理，当系统出口处工质状态为 (p_2, v_2) 时， 1kg 工质流出系统，系统所做的推动功为 $p_2 v_2$ 。

(五) 闭口系统的能量方程

闭口系统的能量方程根据能量守恒原则，外界能量的减少量应该等于热力系能量的增加。单就热力系统而言，其表达式为

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统中储存能量的增加} \quad (1-12)$$

对于闭口系统，进入和离开系统的能量只包括热量和做功两项。

如图 1-4 所示，取气缸活塞系统中的工质为系统。设系统开始时处于平衡态 1，过程中系统吸热 Q ，对外膨胀做功 W ，最后到达平衡态 2。若工质的宏观动能和位能的变化可忽略不计，则工质（系统）储存能的增加即为热力学能的增加 ΔU 。根据式 (1-12) 可得

$$Q - W = \Delta U$$

即

$$Q = \Delta U + W \quad (1-13)$$

式 (1-13) 是热力学第一定律应用于闭口系统的能量方程式，是最基本的能量方程式，称为热力学第一定律的解析式。它对闭口系统各种过程（可逆过程或不可逆过程）各种工质都适用。

对于微元过程：

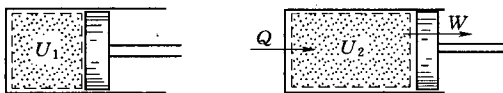


图 1-4 闭口系统能量平衡

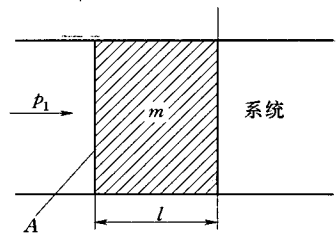


图 1-3 推动功示意图

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (1-14)$$

对于 1kg 工质, 则有

$$q = \Delta u + w \quad (1-15)$$

或

$$\delta q = du + \delta w \quad (1-16)$$

(六) 稳定流动系统的能量方程

若流动过程中, 开口系统内部及其边界上各点工质的热力参数都不随时间而变, 这种流动过程称为稳定流动过程。

图 1-5 是一稳定流动系统, 假想截面 1-1 和截面 2-2 之间的空间为研究对象, 工质不断地从截面 1-1 流进系统, 从截面 2-2 流出系统。外界不断地供给系统热量, 系统同时对外输出轴功。

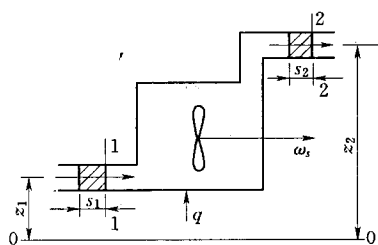


图 1-5 稳定流动系统示意图

假定单位时间内有 1kg 工质从截面 1-1 进入系统, 其参数为压力 p_1 、比容 v_1 、温度 T_1 、热力学能 u_1 、速度 c_{f1} , 进口截面 1-1 的中心距基准面的高度为 z_1 , 根据稳定流动的概念, 在同样的时间内也有 1kg 工质从截面 2-2 流出系统, 其参数为压力 p_2 、比容 v_2 、温度 T_2 、热力学能 u_2 、速度 c_{f2} , 出口截面 2-2 的中心距基准面的高度为 z_2 。

在单位时间内经过截面 1-1 的工质带入系统的能量有:

- (1) 工质的热力学能 u_1 , J/kg。
- (2) 工质的宏观动能 $\frac{1}{2}c_{f1}^2$, J/kg。
- (3) 工质的重力位能 gz_1 , J/kg。
- (4) 外界对系统做的流动功 p_1v_1 , J/kg。

同理, 1kg 工质流出系统时, 带走的能量有:

- (1) 工质的热力学能 u_2 , J/kg。
- (2) 工质的宏观动能 $\frac{1}{2}c_{f2}^2$, J/kg。
- (3) 工质的重力位能 gz_2 , J/kg。
- (4) 外界对系统做的流动功 p_2v_2 , J/kg。

此外, 在单位时间内, 外界向系统加入了热量 q , 系统向外界输出轴功 w_s 。

根据稳定流动的条件, 可以列出能量平衡方程式:

$$u_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1 + p_1v_1 + q = u_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2 + p_2v_2 + w_s$$

整理后, 得

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_s \quad (1-17)$$

对于 m kg 工质

$$Q = (H_2 - H_1) + \frac{1}{2}m(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + mg(z_2 - z_1) + W_s \quad (1-18)$$

对于微元过程

$$\delta Q = dH + \frac{1}{2} mdc_f^2 + mg dz + \delta W_s \quad (1-19)$$

$$\delta q = dh + \frac{1}{2} dc_f^2 + g dz + \delta w_s \quad (1-20)$$

式(1-17)称为稳定流动系统的能量方程,它适用于理想气体和实际气体,也适用于可逆过程和不可逆过程。

若将 $\frac{1}{2}m\Delta c_f^2$ 、 $mg\Delta z$ 和 W_s 三项之和称为技术功(技术上可资利用的功),用 W_t 表示,即

$$W_t = \frac{1}{2}m\Delta c_f^2 + mg\Delta z + W_s \quad (1-21)$$

将式(1-21)代入式(1-17),稳定流动系统的能量方程也可写成

$$Q = \Delta H + W_t \quad (1-22)$$

对于单位质量工质

$$q = \Delta h + w_t \quad (1-23)$$

对于微元过程

$$\delta Q = dH + \delta W_s \quad (1-24)$$

$$\delta q = dh + \delta w_s \quad (1-25)$$

(七) 稳定流动系统能量方程的应用

1. 动力机械

利用工质膨胀而获得机械功的热力设备,称为动力机械,如汽轮机等。

图1-6是动力机械的示意图。工质流经动力机械时,工质膨胀,压力降低,对外做轴功。由于工质进、出口速度相差不大,可认为 $\frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) \approx 0$;进、出口高度相差很小,可认为 $g(z_2 - z_1) \approx 0$;又因工质流经动力机械所需的时间很短,可认为是绝热过程。因此,稳定流动能量方程简化为

$$w_s = h_1 - h_2$$

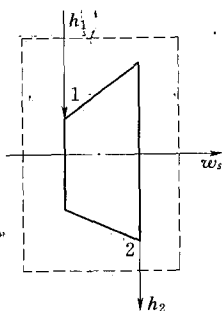


图1-6 动力机械示意图

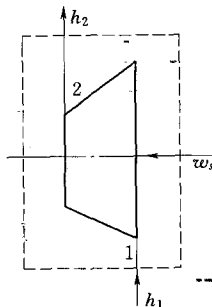


图1-7. 压缩机械示意图

2. 压缩机械

如图1-7所示;当工质流经泵、风机、压气机等一类压缩机械时,受到压缩,压力