



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

PUTONG GAODENG JIAOYU SHIERWU GUIHUA JIAOCAI GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU

发电厂动力部分

FADIANGHANG DONGLI BUFEN

李如秀 余素珍 主编 ●



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

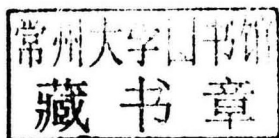


普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）
职业教育电力技术类专业教学用书

发电厂动力部分

FADIANCHANG DONGLI BUFEN

主 编 李如秀 余素珍
编 写 唐琳艳 刘 聪
主 审 李加护



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书介绍了火力发电厂动力部分、核电厂动力部分及水电厂动力部分的基本理论和基本知识，着重介绍了火力发电厂各动力设备的作用、结构和工作原理、主要系统布置和运行方式。每章前均附有学习内容和学习要求，每章后附有一定量的复习思考题，供复习参考。

本书可作为高职高专发电厂及电力系统、电厂化学等专业的教学用书，也可供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/李如秀，余素珍主编. —北京：中国电力出版社，2011.12

普通高等教育“十二五”规划教材·高职高专教育

ISBN 978-7-5123-2538-8

I. ①发… II. ①李…②余… III. ①发电厂—动力装置—高等职业教育—教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 277946 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 2 月第一版 2012 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 377 千字

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

编 委 会

主任委员 章国顺 付小平

副主任委员 杜中庆

编写顾问 胡念苏

委 员 (以姓氏笔画为序)

王赛闽 石 平 孙大耿 付爱彬 冯家强

江文贱 余素珍 李 庆 李如秀 杨 虹

杨小君 汪卫东 沈 鲛 陈家瑁 苗 军

柯选玉 胡青春 赵玉莲 饶金华 徐艳萍

徐智华 崔艳华 黄建荣 程延武 谢亚清

谢利玲 蔡铎如 樊友平 魏蓄芳

前 言

为了贯彻落实《教育部关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》和《以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织编写普通高等教育“十二五”规划教材。依据学院编委会的指导性意见和大纲要求，我们编写了本书。

本书紧密联系电厂生产实际，以600MW火电机组为典型机组，着重介绍了火力发电厂中各动力设备的作用、结构和工作原理、主要系统布置、运行知识和火电厂的主要经济指标；并且简略介绍了核电厂及水电厂各主要动力设备的基本结构和工作原理。本书反映了新设备、新工艺的应用，符合当代电力技术的发展水平，具有科学性、先进性、适用性。书中体现了职业教育的性质、任务和培养目标，具有明显的职业教育的特色，符合职业教育的特点和规律。每章前均附有学习内容和学习要求，章后附有一定量的复习思考题，供复习参考。本书作为高职高专发电厂及电力系统、电厂化学专业的教学用书，教师在使用本书时，可以根据专业特点对教材内容进行取舍。

本书由江西电力职业技术学院余素珍编写绪论及第一、二、三章；刘聪编写第四章；李如秀编写第五、六章；唐琳艳编写第七、八章。全书由李如秀统稿。

本书由华北电力大学李加护教授主审。

本书编写过程中得到学院领导和编委会的大力支持和帮助，在此致以谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2012年1月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 热力学基本概念与基本定律	6
第一节 热力学基本概念	6
第二节 热力学第一定律	15
第三节 热力学第二定律	20
复习思考题	26
第二章 水蒸气及其动力循环	27
第一节 水蒸气的定压形成过程	27
第二节 水蒸气的典型热力过程	35
第三节 水蒸气动力循环	41
复习思考题	49
第三章 热传递的基本原理	51
第一节 热传导	51
第二节 热对流	58
第三节 热辐射	63
第四节 传热过程与换热器	67
复习思考题	75
第四章 锅炉设备及运行	77
第一节 电厂锅炉概述	77
第二节 锅炉的燃烧系统及设备	82
第三节 锅炉的汽水系统及设备	107
第四节 锅炉热平衡	123
第五节 输煤系统、除尘及除灰系统	126
第六节 锅炉运行基本知识	135
复习思考题	148
第五章 汽轮机设备及运行	150
第一节 汽轮机概述	150
第二节 汽轮机本体结构	153
第三节 汽轮机的基本原理	161
第四节 汽轮机的主要辅助设备	170
第五节 汽轮机调节保护及供油系统	177
第六节 汽轮机运行的基本知识	184
复习思考题	186
第六章 凝汽式发电厂的热力系统及主要经济指标	188
第一节 凝汽式发电厂的热力系统	188
第二节 凝汽式发电厂的主要经济指标	195

复习思考题·····	197
第七章 核动力部分 ·····	198
第一节 核能发电站概述·····	198
第二节 压水堆核电站的基本工作原理·····	205
复习思考题·····	209
第八章 水力发电厂动力部分 ·····	211
第一节 水力发电厂概述·····	211
第二节 水电厂的主要水工建筑物·····	216
第三节 水轮机·····	219
第四节 水轮机转速调节和运行·····	225
复习思考题·····	227
附录 ·····	228
参考文献 ·····	241

绪 论

一、能源的分类及其品质

能源的开发和利用程度是人类社会生产发展的一个重要标志。所谓能源，是指可为人类生产和日常生活提供各种能量和动力的物质资源。迄今为止，人类发现的自然界中可被利用的能源有风能、流水能、太阳能、潮汐能、地热能、燃料的化学能、原子核能、海洋能以及其他一些形式的能量。在这些能源中，除风能和流水能是以机械能的形式提供给人类外，其余各种能源往往直接或间接的以热能的形式向人类提供能量。例如，太阳能和地热能是直接的热能；燃料的化学能，包括固态的煤、液态的石油和气态的天然气，都是通过燃烧将化学能释放变为热能供人类利用。因此，以热能形式提供的能量占了能源相当大的比例，从某种意义上讲，能源的开发和利用就是热能的开发和利用。

热能的利用有两种基本方式，一为直接利用，即将热能直接用来加热物体，热能的形式不发生变化，如烘干、蒸煮、采暖、焙烧、冶炼等；二为间接利用，即将热能转换为机械能或进一步再转化为电能加以利用，如热力发电厂，车辆、船舶、飞机等交通运输，石油化工、机械制造的动力装置。在热能的间接利用中，热能的能量形式发生了转换。

热能的间接利用是现代利用热能的主要方式。尤其是电能，由于具有传输和使用灵活、易于控制且易于转换为其他形式的能量等诸多优点，已成为发展现代社会物质文明的重要条件。在能源的利用中，电能利用率占总能源利用的比例已成为国民经济发展水平的标志。

人类通常把现成形式存在于自然界中的、能直接获得又不改变其基本形态的能源称为一次能源。如各类化石燃料——煤炭、石油、天然气和核燃料等，它们是地球亿万年前凝聚保存太阳辐射能形成的载能体，将随人类开发利用逐渐减少而且短期内不能再生，所以又称非再生能源。把由于太阳的辐射作用产生的风能、流水能、太阳能、潮汐能等称为再生能源，它们不会随本身的转化和人类的利用而日益减少。消耗一次能源并通过人类生产活动制取的能源称为二次能源，如电能、氢能、石油制取的各类成品油类、火药等。能源分类见表 0-1。

表 0-1 能 源 分 类

一次能源	非再生能源	各类化石燃料（煤炭、石油、天然气）和核燃料（铀、钍、钚）等
	再生能源	风能、流水能、潮汐能、海洋能、地热能、草木燃料等
二次能源		电能、氢能、焦炭、酒精、石油制取的各类成品油类、火药等

国民经济各部门和人民生产、生活活动广泛使用的热能、机械能和电能，都可以从一次能源利用一定设备获得，并实现相互之间的转化，以适应生产和科学技术领域中不同目的、不同形式的需要。性质不同的各种能源的开发利用程度，取决于能源品质、转化难易程度和科学技术的发展水平。因此，某种一次能源是否成为社会用能的主力能源而被广泛的加以开发利用，主要受下面品质指标的限制：

(1) 是否具有大的能流密度和天然储量。能流密度是指一定物质的某种能源中, 实际可获取的能量和功率。如化石燃料的能流密度较大, 1kg 化石燃料通常可释放出 $(2\sim 4)\times 10^8\text{J}$ 的化学能; 虽然化学能不能再生, 但其能流密度和储量受自然条件影响很大; 具有一定储量的非再生性能源有很大的能流密度, 1kg 的 U_{92}^{235} 完全裂变, 理论上可以获得 $8.32\times 10^{13}\text{J}$ 的能量, 相当于 2800t 优质煤的发热量。

(2) 是否有较低的开发费用和设备价格。各种化石燃料和核燃料的探测、开采、加工、运输, 都需要大量的人力物力的投资。考虑发电设备造价, 按目前技术投资水平, 每千瓦约需人民币千元以上; 其中核电、水电投资较大, 燃油、燃气发电投资较低。

(3) 是否有较高的能源品质和较低的环境污染。能源品质是指能源价值和转换率的高低。如机械能或电能可以自发地全部转换为热能, 说明这种形式的能转换能力较强, 是品质较高的能, 有时也称为高级能。

综上所述, 能源种类很多, 也各有优缺点。能源开发与利用与国家能源储量、经济发展、科学技术水平、环境质量标准以及社会需求等复杂因素密切相关。煤炭、石油、天然气、水力和原子裂变核能, 构成了当前世界一次能源的五大支柱; 而其中石油、天然气和优质煤越来越多地被当作宝贵的化工原料来使用, 世界各国不再毫无节制地把它们当作燃料消耗掉; 劣质煤、水力、核裂变能则越来越多地成为能源消费的主体。

二、热能在电力工业和国民经济中的地位和作用

将热能最终转换为电能的热力发电(火力发电、热力发电、核电厂)目前占世界总发电量的 80% 左右, 预计今后相当长的一个时期内, 热力发电仍将在电力工业中占据主要地位。

电力工业是国民经济的重要基础工业, 是国家经济发展战略中的重点和先行产业。我国早在新中国成立初期就确立了电力工业先行的地位。从各时期电力生产与经济增长的比较来看, 大部分时期电力生产的增长超过了 GDP 的增长, 并且往往在经济持续增长的年份, 电力生产弹性系统要接近或大于 1, 电力工业作为国民经济的重要先行产业的作用十分明显。

从电力能源消费在一次能源中的比重和在终端能源消费的比重来看, 发电能源占一次能源消费的比重 1985 年为 6.37%, 1995 年为 9.18%, 2000 年为 11.2%, 呈逐年上升趋势, 电力行业已成为能源工业中的支柱产业。

中国电力联合会 2011 年 2 月 9 日发布分析报告称, 产业发展、节能措施及电价政策等实施程度及效果, 将对用电增长及用电结构产生较大影响。2011 年全国全社会用电量达到 4.7 万亿 kWh, 同比增长 12%, 而到 2015 年, 预计全社会用电量将达到 6.27 万亿 kWh 左右, “十二五”期间有望年均增长 8.5%, 电力工业成为国民经济重要的基础产业的作用呈现逐渐增强的趋势。

纵观 20 世纪的社会和经济发展, 一个突出特点是电力的使用已渗透到社会经济、生活的各个领域。由于电力具有便于转换能源形式、能高度集中和无限划分、清洁干净和易于控制、可大规模生产和远距离输送等特性, 使电力发展和应用的程度即一个国家的电气化程度成了衡量其社会现代化水平高低, 以及物质文明和精神文明高低的重要标志之一。

特别是在进入以信息、电子、生物技术为代表, 从集中到分散, 从等级结构到网络结构, 从简单选择到多种选择的 21 世纪, 电力将继续发挥其他能源形式所不能替代的作用, 而且对电力的依赖程度将更高, 对电力供应的数量和品质也将提出更高的要求。

三、发电厂的类型及火电厂的生产过程

发电厂利用一次能源、借助相应的动力装置、按照不同的转换方式生产电能。根据能源种类或转换的不同，将电厂分成不同类型。按使用能源分为火力发电厂、水力发电厂、风力发电和核能发电厂。

在我国，发电量比例最高的是火力发电厂。据统计，截止到 2011 年底，我国发电装机容量达到 10.5 亿 kW，其中火电为 7.6 亿 kW，占 72.38% 左右。国家电网公司总经理刘振亚表示，到 2020 年，我国用电需求将达 7.7 万亿 kWh，发电装机容量将达 16 亿 kW 左右，在现有基础上接近翻一番。

火力发电厂是指利用煤、石油或天然气等作为燃料生产电能的工厂，简称火电厂。我国的火电厂以燃煤为主，过去曾建过一批燃油电厂，当前尽量压缩烧油电厂，新建电厂全部烧煤。

火电厂从能量转换的观点分析，其生产过程是基本相同的，其实质是一个能量转换的过程。首先在锅炉中，燃料的化学能通过燃烧转换为蒸汽的热能，接着在汽轮机中将蒸汽的热能转换为机械能，最后在发电机中将机械能转换为电能。因为锅炉、汽轮机、发电机三大设备分别完成了能量形式的三次转换，所以锅炉、汽轮机、发电机又称为火电厂的三大主机。

图 0-1 是以煤为燃料的火电厂生产过程示意。

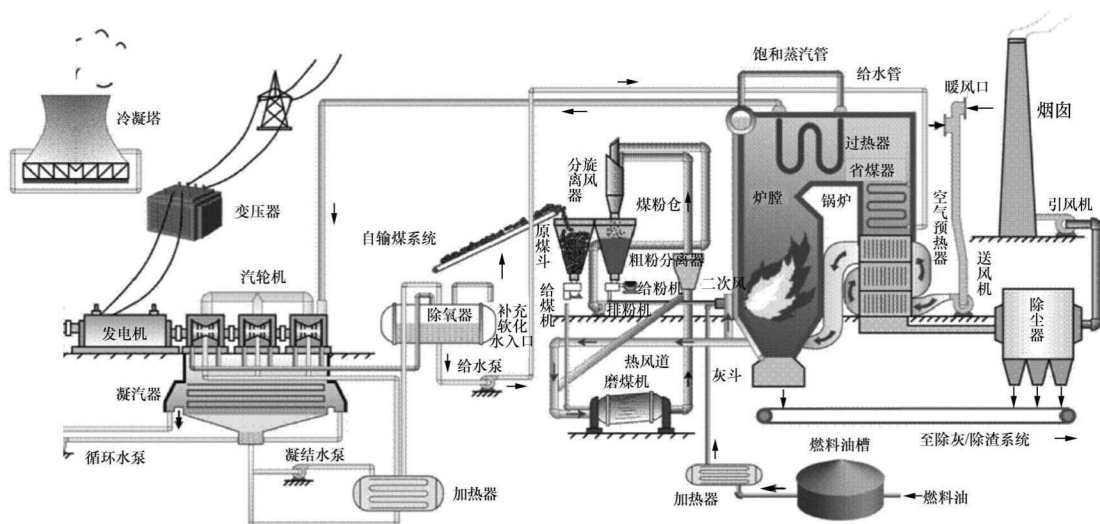


图 0-1 火电厂生产过程示意

(一) 燃料运输

燃料运输是火电厂辅助生产系统，其过程是：煤经运输工具（火车、汽车、轮船等）运入电厂的储煤场进行储存。使用时，再利用扒煤机等煤场设备把煤送上输煤皮带，经转运、碎煤到锅炉的原煤斗（或原煤仓）。

(二) 制粉系统

制粉系统的任务是将原煤干燥，磨成一定细度的煤粉，送入炉膛进行燃烧。

制粉系统的工作过程是：煤从原煤斗落入磨煤机，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，由排粉机经燃烧器喷入炉膛内进行燃烧。

（三）燃烧系统

燃烧系统的任务是供给锅炉所需的燃料及空气在炉膛内进行良好燃烧，同时将燃料燃烧时放出的热量传递给锅炉各受热面，使受热面内的水、汽温度压力提高，成为高热能蒸汽。

燃烧系统的工作过程是：燃烧器将合格的煤粉混以一定适量的热空气喷入炉膛进行燃烧，燃烧后的热能传递给燃烧室的水冷壁上，水冷壁内的水吸收热量后变成蒸汽。煤粉在炉膛内燃烧时，需要充足的空气，空气由送风机送来，先在空气预热器预热后送入炉膛内。这种热空气有三个作用，即供给燃料燃烧、煤的干燥和煤粉输送。煤在炉内燃烧产生的产物——高温烟气，在引风机的作用下，沿着锅炉本体烟道依次流过炉膛、过热器、省煤器和空气预热器，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，排入大气。

（四）除灰渣系统

除灰渣系统的任务是对即将进入烟囱的高空排放的烟气进行除尘和对燃烧产生的灰渣进行清理，减少对环境的污染。

炉内煤粉燃烧后的煤渣由捞渣机从炉底捞出并冲入地道，再流至灰渣泵房，灰渣泵房将灰渣利用管道送至灰场。除尘器出来的灰可以送入灰渣房再送至灰场，也可以直接由气力输送管道或车辆送到灰渣利用单位。

（五）汽水系统

汽水系统包括主蒸汽系统、给水系统、回热抽汽系统、主凝结水系统等，其主要设备包括锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵、除氧器、加热器、凝结水泵等。

锅炉的给水先进入省煤器，利用烟气的余热加热后进入汽包，再从下降管经炉墙外侧流入下联箱，而后进入由许多水管组成的水冷壁。水在水冷壁内吸收炉膛内热量，水被加热直到汽化，汽水混合物沿水冷壁再次进入汽包，经汽水分离器使汽和水分离。分离后的水又进入下降管，再进入水冷壁继续吸热；而分离出的饱和蒸汽经过热器继续吸热成为过热蒸汽，然后送入汽轮机做功。

锅炉产生的新蒸汽进入汽轮机后逐级进行膨胀，蒸汽的热能就转换成汽流的动能；高速汽流作用于汽轮机的动叶片上，推动了叶轮连同整个转子旋转，汽流的动能被转换成汽轮机轴上的机械能。汽轮机带动发电机，利用切割磁力线感应原理，将机械能转换为电能。

在汽轮机中做完功的蒸汽（常称为乏汽）排入凝汽器，在凝汽器中放热而凝结成水，再经凝结水泵打入低压加热器、除氧器，经给水泵压入高压加热器，经省煤器送入锅炉汽包，使水重新在锅炉受热面吸收热量变成高温高压的蒸汽。

（六）电气系统

火电厂的电气系统包括发电机、主变压器、高压配电装置等。电气系统中，一路是把发电机产生的电能经主变压器使电压升高，再经高压配电装置和升压站后将电能输出；另一路是经厂用变压器通过厂用配电装置送给电厂的各用电设备。

从火电厂的产生过程可见，就其能量转换来说，可以分为两大部分，即从燃料的化学能转变为机械能的部分和从机械能转变为电能的部分。前者称为发电厂的热力部分，后者称为发电厂的电气部分。

核电动力部分核能发电的基本知识，压水堆核电站设备和系统。水电动力部分主要介绍

水力发电的基本原理，水流的功率和水电站的发电量，水电站的类型，水电厂主要水工建筑物；水轮机类型、工作原理以及工作效率；水电厂的主要辅助设备；水轮机调速系统及其运行。

本教材包括的内容较多，涉及的知识范围较广，理论和实际联系紧密。学习中应以基本概念、基本理论和基本结构为重点，努力培养分析问题和解决问题的能力，只有这样才能在将来电厂实际工作中取得较快的进步，真正成为电力生产技术应用型人才。

第一章 热力学基本概念与基本定律



学习内容

1. 热力学基本概念。
2. 热力学第一定律。
3. 热力学第二定律。



重点、难点

教学重点：热力学基本概念。

教学难点：热力学第二定律。



学习要求

了解：热力学基本概念；热力学两大定律的实质。

掌握：热力学两大定律在实际应用中的不同表达形式。



内容提要

本章首先介绍热力学中的一些基本概念，如状态、状态参数、工质、热力系、平衡状态、可逆过程等。然后介绍热力学中的两个基本定律，即热力学第一定律和热力学第二定律，重点分析两个基本定律的具体内容、实质以及在实际中的应用。最后分析理想气体的性质及状态方程式。

第一节 热力学基本概念

热力学中的一些基本概念，如工质、状态参数、平衡状态、可逆过程等，在热力学中非常重要，几乎随时都会遇到，因此，必须准确理解和掌握这些概念。

一、工质与热力系

（一）热机

热力学中，热能转换为机械能必须依靠一定的热力设备来完成。这种用来实现热能转换为机械能的热力设备称为热机，如汽轮机、燃气轮机、内燃机等。

（二）工质

将在热机中完成能量转换的中间媒介物质称为工质。

为了将热能最大限度地转变为机械能，在热机中工作的工质应具有良好的流动性和膨胀性。因此常选用气态物质作为工质，如空气、水蒸气、燃气等。

目前火电厂采用水蒸气作为工质。

（三）热源

我们把不断向工质提供热能的物体称为高温热源，简称热源，如锅炉中的高温烟气等。

把不断吸收工质所释放废热的物体称为低温热源，简称冷源，如凝汽器等。在热动力装置中，热源不断给工质提供热能，在热机中工质将一部分转换为机械能，另一部分释放给冷源。如图 1-1 所示。

(四) 热力系

1. 热力系

分析研究任何一个热力学问题，首先必须明确所考虑的研究对象。研究对象应根据所研究问题的实际情况，并以解决问题方便为原则来选取。在热力学中，要将分析研究的对象从周围物体中分割出来，研究它通过界面与周围物体之间的能量交换。这种被人为分割出来的、具体指定的热力学研究对象称为热力系统，简称热力系。

如图 1-2 (a) 所示，在汽缸与活塞所封闭的空间里有一定量的气体。当研究气体受热膨胀而举起活塞上的重物这一热变功的问题时，汽缸中封闭的气体就是所要研究的对象，即所选取的热力系。如图 1-2 (b) 所示汽轮机，取进出口截面 1-1、截面 2-2 及汽缸内壁所包围的空间即为所选取的热力系。

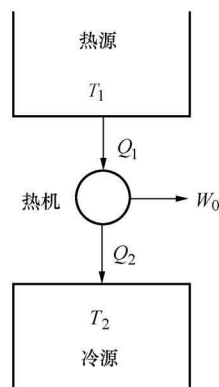


图 1-1 热动力装置示意

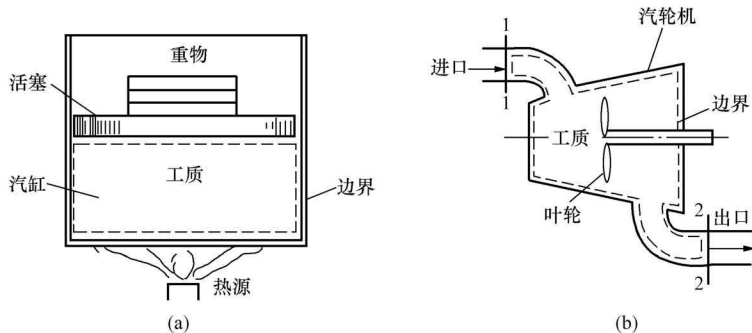


图 1-2 热力系统

(a) 闭口热力系；(b) 开口热力系

2. 热力系分类

分析研究任何一个热力学问题时，首先必须明确所考虑的热力系的范围。热力系的范围应根据所研究问题的实际情况，且以解决问题方便为原则来选取。

一般情况，热力系与外界总是处于相互作用之中，它们可能以热和功的形式进行能量传递，也可能同时有物质的交换。按照热力系与外界进行交换的情况，热力系可划分成若干类型。

按照热力系与外界进行物质交换的情况，热力系可划分为以下两类：

(1) 闭口热力系。热力系与外界可以有能量的传递，但没有物质的交换，其质量是恒定不变的，也称封闭热力系。如图 1-2 (a) 所示。

(2) 开口热力系。热力系与外界既可以有能量的传递，也可以有物质交换，其内部质量可以保持恒定或发生变化，也可称变质热力系。如图 1-2 (b) 所示。

按照热力系与外界进行能量交换的情况，热力系又可划分为以下两类：

(1) 绝热热力系。热力系与外界没有热量交换。

(2) 孤立热力系。热力系与外界不发生任何关系。

显然，因为自然界中的一切事物都是相互联系和相互制约的，所以绝对的绝热热力系和孤立热力系实际上是不存在的。但在某些特殊情况下，可以简化为这两个理想的模型。

如果某些实际的热力系，在某段时间内与外界的热量很少，对于系统的能量传递和能量转换所起的作用可以忽略不计，则这样的系统就可以近似地看作绝热热力系。如图 1-3 (a) 所示的热力系，通常蒸汽通过汽缸壁对外散失的热量，与蒸汽在汽轮机中进行的能量转换相比是非常小的，因此在实际计算时常把它当作绝热系看待。

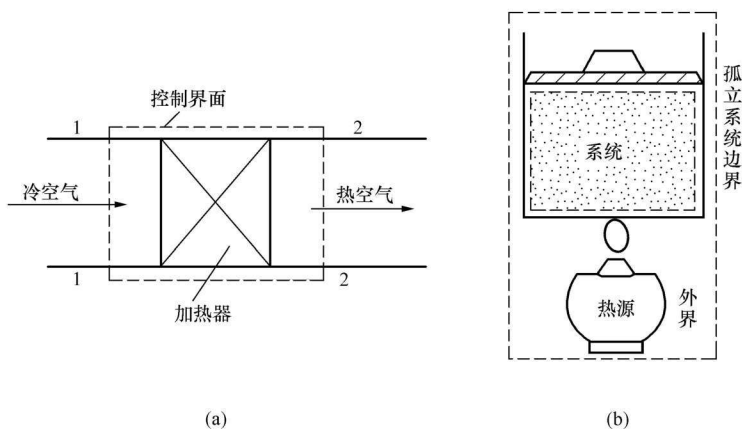


图 1-3 热力系统

(a) 绝热系统；(b) 孤立系统

另外，由于一切热力现象所涉及的空间范围总是有限的，因此，如果我们将研究对象连同与它直接相关的外界所有物体一起取作一个新的热力系，则因该系统与外界不发生任何能量和物质的交换，它就是一个孤立热力系。如图 1-2 (a) 所示的系统，它与热源、汽缸活塞以及活塞上的重物一起就可以共同构成一个孤立热力系。此时，原来的闭口热力系以及与其发生相互作用的所有物体都可看作是孤立热力系中的组成部分。另外，图 1-3 (b) 所示系统可看成孤立系。

需要指出的是，绝对的绝热热力系和孤立热力系是不存在的。绝热热力系和孤立热力系都是热力学中的抽象概念，它们常能反映客观事物的本质，这种科学的抽象将给热力学的研究带来很大的方便，在后面的学习中，我们还会遇到很多从客观事物中抽象出来的基本概念。在抽象的过程中，略去不起作用的次要因素，抓住事物的本质，因而这些概念能代表某些实际事物的主要方面。绝热热力系和孤立热力系是热力学中的两个重要概念，它们的建立和应用可以使某些实际热力系的研究得到简化。并且，将热力学基本定律应用于孤立热力系所得出的一些推论，在热力学中具有重要的意义。

二、工质的热力状态及其状态参数

在动力装置中，热能转换为机械能是借助工质膨胀做功来实现的。显然，在此过程中，工质的压力、温度等一些物理特性随时都在改变，或者说工质的热力状态随时都在改变。所以，工质的热力状态，是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理特性。用来描述和说明工质热力状态的一些宏观物理量则称为工质的状态参数。工质的各状态参数只取决于工质的状态，也就是说，工质的状态与状态参数是一一对应的。所以当工质的状态发生变化时，状态参数的变化量只与初、终状态有关，与状态变化过程无关。

热力学中常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓、熵。其中的压力、温度、比体积可以直接测量或经简单计算求得，称为基本状态参数；另外三个参数可根据基本状态参数间接求得，称为导出状态参数。

三、基本状态参数

(一) 温度

温度是标志物体冷热程度的一个物理量。

工质的温度可以用温度计测量，工程上常用的温度计有热电偶温度计和热电阻温度计。各种温度计测出的温度数值应该用统一的方法来表示，表示温度数值的方法称为温标。

国际单位只采用常用热力学温标为基本温标。用这种温标确定的温度称为热力学温度，符号为 T ，单位为开尔文，符号为 K。

与热力学温标并用的还用热力学摄氏温标，简称摄氏温标。它所确定的温度称为摄氏温度，用 t 表示，单位为摄氏度，符号 $^{\circ}\text{C}$ 。热力学两种不同温标之间的换算关系为

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

(二) 压力

物体单位面积上所承受的垂直作用力称为压力。气体压力是气体分子作不规则运动时撞击容器器壁的结果。因此，气体压力是指大量气体分子撞击容器器壁时，在单位面积上所产生的垂直方向的平均作用力。

1. 压力的测量

工质的压力常用压力表或真空表测量。工程上常用的压力表有 U 形管式压力计 [见图 1-4 (a)、(b)] 和弹簧管式压力计 [见图 1-4 (c)]。

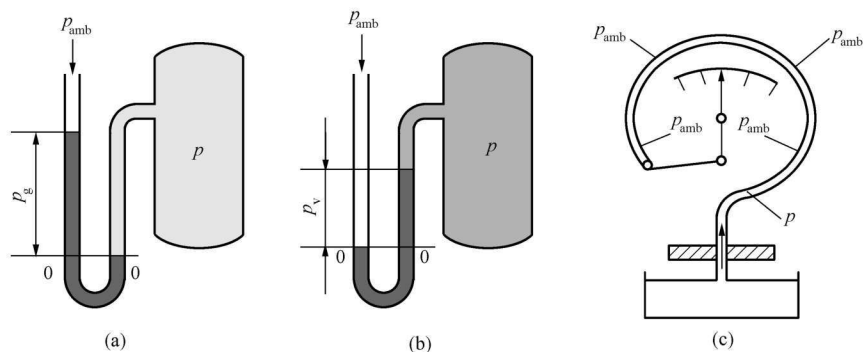


图 1-4 压力计

(a)、(b) U 形管式压力计；(c) 弹簧管式压力计

2. 压力的分类

在电厂中，由于测量仪表的结构不同，同时测量仪表均处于当时当地环境压力（大气压力）下，因此，仪表的指示值都是系统真实压力与大气压力的差值，所测出的压力可分为绝对压力、表压力（也称正压）和真空（也称负压）。

(1) 绝对压力。容器内工质的真实压力称为绝对压力，用符号 p 表示。在工程热力学分析计算中，只有绝对压力 p 才是表征系统真实压力的状态参数。

(2) 表压力。如果绝对压力大于大气压力时, 测压表计称为压力表, 此时指示值为正值, 该表指示的压差值称为表压力, 用符号 p_g 表示。若大气压力用符号 p_{amb} 表示, 则绝对压力与表压力之间的关系式为

$$p = p_g + p_{amb} \quad (1-2)$$

在电厂中, 表压力即为压力表所测出的压力。

(3) 真空。如果绝对压力小于大气压时, 其绝对压力小于大气压力之差额, 测压力表计称为真空表, 此时指示值为负值, 该表指示压差的绝对值称为真空, 用符号 p_v 表示。真空与绝对压力之间的关系式为

$$p = p_{amb} - p_v \quad (1-3)$$

在电厂中, 真空即为真空表所测出的压力。

火电厂有时用百分数表示真空值的大小, 称为真空度。真空度是真空值与大气压力之比的百分数, 即

$$\text{真空度} = (\text{真空值} / \text{大气压力}) \times 100\%$$

3. 压力的单位

压力用国际单位制帕斯卡 (Pa) 表示, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$; 工程上常用千帕 (kPa) ($1\text{kPa}=1 \times 10^3\text{Pa}$) 和兆帕 (MPa) ($1\text{MPa}=10^3\text{kPa}=10^6\text{Pa}$) 作为计量单位。

另外压力还可以用液柱高度作单位, 常见的有 mmHg(毫米汞柱) 和 mmH₂O(毫米水柱), 它们与 Pa 之间的换算关系分别为

$$1\text{mmHg} = 133.3\text{Pa} \quad 1\text{mmH}_2\text{O} = 9.81\text{Pa} \quad (1-4)$$

在我国小型的火力发电厂, 一些老设备型号中, 仍有采用工程大气压 (at) 作为压力单位。

工程大气压与 Pa 之间的换算关系分别为

$$1\text{at} = 98\,070\text{Pa} = 9.807 \times 10^5\text{Pa} \quad (1-5)$$

物理学中, 把纬度 45° 海平面上的常年平均气压定为标准大气压或称物理大气压, 用符号 atm 表示, 其值为 760mmHg, 显然

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1.013\,25 \times 10^5\text{Pa} \quad (1-6)$$

(三) 比体积

系统中工质所占的总空间称为容积, 用 V 表示。单位质量的工质所占有的总体积, 称为工质的比体积, 符号为 v , 单位为 m^3/kg 。工质的比体积可以用式 (1-7) 计算

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-7)$$

式中: V 为工质的体积, m^3 ; m 为工质的质量, kg 。

密度是比体积的倒数, 为单位体积内所含工质的质量, 符号为 ρ , 单位为 kg/m^3 。它们之间的关系式为

$$\rho v = 1 \quad (1-8)$$

【例 1-1】 某锅炉出口主蒸汽管道上表压力表读数为 13.2MPa, 当地大气压力为 1atm, 试求该处蒸汽的绝对压力。

解 由绝对压力与表压力的关系, 即式 (1-2), 可直接求得绝对压力为

$$p = p_g + p_{amb} = 13.2 \times 10^6 + 1.013\,25 \times 10^5 = 13.3 \times 10^6 = 13.3(\text{MPa})$$

答 该处蒸汽的绝对压力为 13.3MPa。