



“十三五”普通高等教育本科规划教材

发电厂动力部分 (第三版)

关金峰 李加护 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

发电厂动力部分

(第三版)

主编 关金峰 李加护
编写 于淑梅 危日光
主审 谢诞梅



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。全书分为火力发电厂动力部分、水力发电厂动力部分、原子能发电厂动力部分共三篇十三章，各篇阐述了各电厂动力部分的基本理论和基本知识，主要动力设备的工作原理、结构、系统布置和运行方式。各章后附有习题和思考题，供复习参考。

本书可作为高等院校非热能与动力工程专业教学用书，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/关金峰, 李加护主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2015. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8071-4

I. ①发… II. ①关…②李… III. ①发电厂-动力装置-高等学校-教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 163297 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998 年 9 月第一版

2015 年 8 月第三版 2015 年 8 月北京第二十七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 385 千字

定价 32.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

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

《发电厂动力部分》第一版是根据 1995 年 8 月全国普通高等学校电力工程类专业教学指导委员会扩大会议讨论制定的教材编写大纲的要求，为非能源动力类专业编写的教学用书。2007 年为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》的精神，根据中国电力教育协会组织制定的普通高等教育“十一五”规划教材的编写要求，强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养需求的基础上，对教材进行了修订。

经过“十一五”和“十二五”期间的使用，本书得到了广大院校师生的认可，已累计印刷 26 次，发行量达到 8 万余册，这说明该教材能充分满足相关专业对发电厂动力部分课程的教学需要，体现了本书的教学适用性。为了使教材能反映我国电力技术发展的水平，进一步满足高等学校专业教学的需要，此次修订，对教材内容和体系只做了一些必要的删节、增补和调整，不做大的变动；对电力行业发展现状及相关的新知识和新技术进行更新；对概念、理论的阐述，文字的表达，图文的配合进行了认真的审核和修订。

本书由关金峰编写绪论和第十~十三章，于淑梅、危日光编写第一、二、七~九章，于淑梅、李加护编写第三、五、六章，李加护编写第四章。关金峰、李加护任主编，李加护负责全书的修订和统稿工作。

限于编者水平，本书仍有不足之处，恳请广大师生、读者批评指正。

编 者

2015 年 6 月

第一版前言

《发电厂动力部分》是根据全国普通高等学校电力工程类专业教学指导委员会发电厂教学组，1995年8月扩大会议讨论制定的编写大纲要求，为“电力系统及其自动化”专业（本科）编写的教学用书。

全书按课内50学时编写。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（核电厂）动力部分三篇。各篇阐述了各电厂动力部分的基本理论和基本知识，主要动力设备的工作原理、结构、系统布置和运行方式。各章后附有习题和思考题。在内容编排上，注重吸纳成熟的新技术成果，适应电力技术历史阶段性发展的水平。教师在使用本教材时，可以根据各地区、各院校的教学特点，对教材内容进行取舍。

全书由华北电力大学编写。关金峰任主编。于淑梅编写第一篇；关金峰编写绪论、第二篇、第三篇。由西安交通大学李朝阳审稿。在本教材的编写过程中，听取了各兄弟院校对教材有关内容的取舍意见和建议，在此一并致以谢意。

限于编者水平，对于教材中的缺点和不足，恳请广大师生和读者给予批评指正。

编者

1997年9月

第三版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于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制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

《发电厂动力部分》第一版是根据1995年8月全国普通高等学校电力工程类专业教学指导委员会扩大会议讨论制订的教材编写大纲的要求，为非热动专业（本科）编写的教学用书。该教材的第一版由华北电力大学关金峰主编，其中于淑梅编写了第一篇。教材自1998年9月出版发行以来，已历经十二次重印，为使教材能反映我国电力技术历史阶段性发展的水平，适应普通高等学校专业教学的需要，按照“普通高等教育‘十一五’教材规划”精神，于2005年着手对第一版进行修订工作。

教材修订后，仍由相对自成体系的三篇（第一篇：火力发电厂动力部分；第二篇：水力发电厂动力部分；第三篇：原子能发电厂动力部分）组成，共分为十三章。各章注重基本理论知识的阐述，注重对与大型发电机组发展相适应的主要发电动力设备结构、工作原理、系统布置及运行方式等作较为系统、全面的介绍。各章前附有摘要，各章后附有小结、思考题和习题，便于教学（或自学）中掌握要点和针对各非热动专业教学要求的不同，进行相应的内容取舍。

第二版修订，仍由华北电力大学关金峰教授主编，绪论部分和第十、十一、十二、十三章由关金峰编写；第三、五、六章由于淑梅、李加护编写，李加护增编了第四章（关于流体力学）的相关知识内容，第一、二、七、八、九章由于淑梅、危日光编写。李加护对全部修订稿的整理和组织做了大量工作。

本书由武汉大学谢诞梅教授担任主审，并提出了许多珍贵的意见和建议，在此深表谢意。

限于编者水平，对修订后教材的缺点和不足之处，恳请广大师生、读者批评、指正。

编者
2007年7月

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
绪论	1
第一篇 火力发电厂动力部分	
第一章 热力学基本概念与基本定律	5
第一节 热力学基本概念	5
第二节 热力学第一定律	7
第三节 热力学第二定律	10
本章小结	12
思考题	13
习题	13
第二章 水蒸气及其动力循环	14
第一节 水蒸气的定压形成过程及图表应用	14
第二节 水蒸气的典型热力过程	18
第三节 水蒸气动力循环	21
本章小结	29
思考题	29
习题	30
第三章 热传递的基本原理	31
第一节 导热	31
第二节 对流换热	35
第三节 辐射换热	40
第四节 传热过程与换热器	44
本章小结	49
思考题	50
习题	50
第四章 流体力学基本知识	52
第一节 流体力学基本概念	52
第二节 流体静力学	55
第三节 流体动力学	61

第四节	管流损失和水击	68
本章小结	.....	72
思考题	.....	72
习题	.....	72
第五章	锅炉设备	74
第一节	电厂锅炉概述	74
第二节	燃料的成分及特性	78
第三节	煤粉及其制备系统	81
第四节	煤粉燃烧及燃烧设备	86
第五节	锅炉受热面	91
第六节	锅炉的主要辅助设备	98
本章小结	.....	101
思考题	.....	102
第六章	电厂锅炉运行	103
第一节	锅炉热平衡	103
第二节	锅炉的运行调节	105
第三节	锅炉启动和停运	109
第四节	典型国产某 600MW 超临界压力锅炉设备简介	112
本章小结	.....	115
思考题	.....	116
第七章	汽轮机设备	117
第一节	汽轮机的一般概念	117
第二节	汽轮机本体主要结构	119
第三节	汽轮机级的工作过程	126
第四节	汽轮机损失、效率和功率	131
第五节	汽轮机的主要辅助设备	134
本章小结	.....	140
思考题	.....	141
第八章	汽轮机运行	142
第一节	汽轮机的调节与保护	142
第二节	汽轮机运行基本知识	147
第三节	典型凝汽式汽轮机设备简介	150
本章小结	.....	151
思考题	.....	151
第九章	发电厂的生产系统及热经济性	152
第一节	凝汽式发电厂的热力系统	152
第二节	发电厂供水系统	156
第三节	凝汽式发电厂的热经济性评价	158
本章小结	.....	162

思考题	162
-----	-----

第二篇 水力发电厂动力部分

第十章 水力学基础和水力发电开发利用方式	164
第一节 我国水利水电开发状况和水电开发方针	164
第二节 水能资源特征和水力发电基本原理	167
第三节 水力学基础知识和水流的水能计算	169
第四节 水资源开发方式和水电厂基本类型	174
本章小结	178
思考题	179
第十一章 河流径流调节和水电厂装机容量的选择	180
第一节 河流径流和径流调节	180
第二节 水电厂的特点及其在电力系统中的运行方式	183
第三节 水电厂装机容量的选择和主要技术经济指标	185
本章小结	191
思考题	192
第十二章 水电厂主要水工建筑物和动力设备	193
第一节 水电厂主要水工建筑物	193
第二节 水轮机	196
第三节 水轮机工作原理及效率	207
第四节 水电厂的主要辅助设备	211
第五节 水轮机转速调节和运行	213
本章小结	216
思考题	217

第三篇 原子能发电厂动力部分

第十三章 原子能发电厂动力设备及运行	218
第一节 核能发电基本知识	218
第二节 压水堆核电厂及其一般工作原理	224
第三节 核电厂辐射防护和三废处理	230
第四节 核电厂运行维护基本知识	233
本章小结	235
思考题	237
附录	238
参考文献	244

绪 论

一、能源知识概述

能源，是指产生机械能、热能、光能、电磁能、化学能等各种能量的自然资源，是人类赖以生存和发展工业、农业、国防、科学技术，改善人民生活所必需的燃料和动力来源。

基本性质不同的各种能源，对人类的社会活动有着不同的重要作用。目前人类在日常生活和生产过程中大规模应用的能源，主要来自煤炭、石油、天然气、草木燃料、太阳辐射能；另外还有水力、风力、波浪能，地球内部的地热能，铀、钍、氡等原子核能，它们都是以现成的形式存在于自然界的能源，称之为“一次能源”。通过人类的生产活动，依靠一次能源制取的能源，如电能、煤气、甲醇以及由石油提取出来的各种成品油类等，称之为“二次能源”。

一次能源中的煤炭、石油、天然气等化石燃料和当前可供开发利用的铀、钍、氡等原子核能燃料，都是在远古时代地球自然变迁过程中生成的载能体物质。相对来说，它们随着本身的自然转化，或是人类的开发利用而逐渐减少。这些由地球为人类储存的宝贵能量资源，用一点就少一点，不会再生，称之为不可再生能源。而如水力、风力、草木燃料、地热能和太阳辐射能等，不会因其本身的转化和人类的开发利用而日益减少，它们依自然规律而循环再生和被重复利用，称之为可再生能源。

随着科学技术的发展和人类对能源价值认识的加深，世界上对一次能源的消费结构发生着变化，煤炭、石油、天然气、水力和原子核裂变能，构成了当今世界一次能源的五大支柱。而其中的天然气、石油和优质煤，愈来愈多地被当做宝贵的化工原料使用，世界各国不再毫无限制地把它当做能源消耗掉，而劣质煤、水力、原子核裂变能则越来越多地成为能源消费的主体。加之对风能、地热能、太阳辐射能、生物质能和原子核裂变能等多种能源利用的研究、探索和工业开发，可以预见，世界上耗用一次能源的结构，将会发生更加巨大的变化。

在“二次能源”中，电能是最具生命力的优质能源。它能很方便地转变成机械、热、光、声、化学等多种形式的能量；电能十分便于通过变压设备和电力输送线路，实现远距离传输而损失较少。对电能的生产和使用，能实现有效而精确地控制，在机械加工、化学、生物、医疗、农业生产和国防等各个领域，电能已是无可替代的能源形式，并给某些科学研究和生产技术带来根本性的变革。

在人类生产、生活的各个领域，电气化的程度已是国民经济现代化的重要标志之一。电力工业是为国民经济各个领域提供电能的部门。世界上各个国家发展国民经济的正反两方面经验都证明了，没有雄厚而又高速发展的电力工业为基础，就不可能实现国民经济的高速发展。

二、电力的主要生产方式及其生产过程

电能由各种一次能源按不同的转换方式而获得。具有一定转换规模、能连续不断对外界提供电能的工厂，称为发电厂。

基于一次能源种类和转换方式的不同,发电厂可分为不同的类型,例如:火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、风力发电厂、地热发电厂和太阳能发电厂等。目前世界上已形成规模,具有成熟开发利用技术、并已大批量投入商业运营的发电厂,主要是火力发电厂(简称火电厂)、水力发电厂(简称水电厂)和原子能发电厂(简称核电厂)。

在这些发电厂中,用以实现“燃料”能量释放、热能传递和热能—机械能转换的设备和系统,称作发电厂的动力部分;用于电能的产生、变压、分配的设备和系统,称作发电厂的电气部分。本课程的任务,是针对火力发电厂、水力发电厂和原子能发电厂(核电厂)的动力部分,介绍能量转换的基本规律和转换原理,能量转换所需设备及其系统布置,电厂动力设备的运行和控制、维护等有关知识。

1. 火力发电厂动力部分组成及其生产过程

火力发电厂是利用煤炭、石油、天然气或其他燃料的化学能生产电能的工厂。火电厂的类型很多,但从能量转换观点分析,其基本过程是:燃料的化学能→热能→机械能→电能。世界上多数国家的火电厂以燃煤为主。我国煤炭资源丰富,燃煤电厂点70%以上。一座装机容量为600MW的燃煤火力发电厂,每昼夜所需燃煤量和除灰量,分别高达1万多吨和几千吨。囿于繁重的煤炭运输和灰渣的处理问题,我国将致力于优先发展坑口电厂(如山西、陕西、内蒙古、河南和贵州等煤炭基地)、港口电厂(如东南沿海和沿江地区)和路口电厂(沿铁路主干线)。

煤炭由海、陆路运到火电厂后,经预处理送至主厂房(暂时用不着的部分送至电厂的储煤场),在制粉车间被磨煤机磨制成粒径为 $50\mu\text{m}$ 左右的干燥细煤粉。合格的煤粉与助燃用热空气一起由锅炉燃烧系统设备送入锅炉炉膛。电厂锅炉是一个深和宽各十多米、高几十米的庞大热交换器。煤粉和空气在锅炉炉膛空间内悬浮进行强烈的混合和氧化燃烧,燃料的化学能转化为热能。热能以辐射和热对流方式传递给锅内的高压水介质,分阶段完成水的预热、汽化和过热过程,使水成为高压高温的过热水蒸气。锅炉产生的废气和固态灰渣,经由无害化处理后,烟气排入大气,灰渣做多种经营再利用或排放到储灰场。

锅炉生产的合格蒸汽,经管道有控制地送入汽轮机。汽轮机是一个实现蒸汽热能向机械能转换的高速旋转发动机。蒸汽在汽轮机内绝热地降温降压,其热能部分地转换成汽轮机转子旋转机械功。压力和温度很低的乏汽从汽轮机末端经排汽管排入凝汽器,并在凝汽器中放出汽化热面凝结成水。

凝汽器收集的凝结水,经回热加热系统逐级加热并去除含氧等杂质,再由给水泵一次加压到锅炉所需压力,然后送入锅炉重复上述预热、汽化和过热过程,形成高温高压过热蒸汽,进入汽轮机做功。

高速旋转的汽轮机转子通过联轴器拖动发电机发出电能,电能由发电厂电气部分的升变电设备送入电力系统。

综上所述,燃煤火力发电厂动力部分是由制粉系统设备(磨制煤粉,使之能在锅炉炉膛内迅速而有效燃烧)、锅炉设备(实现燃料化学能的释放,并转变成水蒸气携带的热能)、汽轮机设备(实现蒸汽热能部分地转变为旋转机械能)、凝汽器设备(实现乏汽冷凝,并回收干净的凝结水)和给水泵设备(将给水加压后供给锅炉)等组成的。这些动力设备的结构和系统布置、工作原理和工作过程、设备运行和维护知识,是本课程的重要学习内容之一。

2. 水力发电厂动力部分组成及其生产过程

江河流具有动能和势能。水流量的大小和水头的高低，决定了水流能量的大小。

水能是再生能源，蒸发和降水自然循环使江河水体川流不息。水能又是过程性能源，这种比较集中的能量过程不被利用时，便消耗于自然衍变之中，有的还会造成公害（如洪水泛滥、河床冲蚀和河流改道等）。

水电厂是将水能转变为电能的工厂。从能量转换的观点分析，其过程为水能→机械能→电能。实现这一能量转变的生产方式，一般是在河流的上游筑坝，提高水位以造成较高的水头；建造相应的水工设施，以有控制地获取集中的水流。

水经引水机构将集中的水流引入坝后水电厂内的水轮机，驱动水轮机旋转，水能便被转变为水轮机的旋转机械功。与水轮机直接相连接的发电机将机械能转换成电能，并由电气系统升压分配送入电网。

各种不同类型的水电厂，其动力部分所包括的蓄水、引水等水工设施和水轮机的型式也各不相同。水电厂装机容量的大小，水电厂在电力系统中的地位和调节运行方式等，都是本课程分别予以阐述和分析的重要内容。

3. 原子能发电厂（核电厂）动力部分组成及其生产过程

物质原子的原子核之所以如此紧密地结合在一起，是由于组成核的各个核子（中子与质子）之间，具有强大的结合力。重核分裂和轻核聚合时，都会放出巨大的能量，这种能量统称为“核能”，即通常所说的原子能。人类利用核以发电是在 20 世纪 50 年代开始的，技术上已比较成熟，目前大量投入了商业运营的，只是重核裂变释放出的裂变能用于发电的方式，可控的轻核聚变释放出的核能对电能的转换，仍处于试验探索阶段。

利用重核裂变释放能量发电的核电厂，从能量转换观点分析，是由重核裂变能→热能→机械能→电能的转换过程。囿于重核裂变的强辐射特性，已投入运营和在建的核电厂，毫无例外地划分为核岛部分和发电部分（见图 13-3），用安全防护设施严密分隔开的两部分，共同构成了核电厂的动力部分。

核岛部分的内部介质和设备，都带有较强的放射性。它的重要设备是“重核裂变反应器”，称作“反应堆”。反应堆的功能相当于火力发电厂的锅炉设备。反应堆所燃用的燃料，多为金属铀（U），1kg 金属铀裂变释放出的能量与 2700t 标准煤完全燃烧时释放出的能量相等。反应堆由核燃料、慢化剂、冷却剂、调节控制系统元件、危急保安系统元件、反射体和防护层等组成。由铀燃料棒、调节棒和控制棒组成的堆芯，严格按技术要求装配，浸没在充满慢化剂和冷却剂的反应堆壳体内。通过堆壳外的调节控制系统，控制金属铀进行有规律的连续裂变反应过程，实现堆内可控的（铀）裂变能到热能的转变。冷却剂（一般是高压水）由循环水泵加压后，便在反应堆、蒸汽发生器、一回路循环泵、反应堆密闭系统内循环流动，技术上把上述系统叫做核电厂的一回路系统。重核裂变产生的热能不断由循环流动的冷却剂带出堆芯，并在蒸汽发生器（表面式换热器）内，把来自凝汽器的给水加热成具有一定压力和温度的水蒸气（不带有放射性）。把蒸汽用管路引入汽轮机做功，乏汽则排入凝汽器凝结成水，此凝结水经二回路循环泵加压后送入一、二级预热器预加热，再送入蒸汽发生器蒸发成新蒸汽。技术上把上述系统叫做核电厂的二回路系统。这样，两个独立循环回路系统内的工质，经蒸汽发生器进行换热，完成核电厂的能量转换。核电厂发电部分的汽轮发电机及其设备与火力发电厂没有根本的区别。

由于反应堆的功率不同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。另外,核电厂的反应堆控制、对有害放射性的屏蔽和防护措施等,也远比火力发电厂复杂和具有更高的要求。本教材第十三章针对目前普遍采用的压水堆核电厂动力部分设备结构,工作原理,一、二次系统布置及运行等问题,进行概括性的分析和阐述。

三、我国电力工业现状与发展简述

作为工农业生产动力基础的电力工业,其规模与发展水平是衡量国民经济发展和综合国力的一个重要标志。优越的社会主义建设环境和丰富的煤炭、石油及水力资源蕴藏量,迅速改变了我国解放初期只有 1849MW 装机容量(当时占世界第 21 位)和 43.1kW·h 年发电量(当时占世界第 25 位)的电力工业落后面貌。尤其自 1978 年以来,改革开放、发展国民经济的正确决策和我国综合国力的提高,使我国的电力工业取得了突飞猛进、举世瞩目的辉煌成就。到 1995 年末,全国发电设备总装机容量突破 2 亿 kW;到 2000 年末,达到 3.2 亿 kW;截至 2013 年末,全国发电装机总量达 12.47 亿 kW,其中,火电 8.6 亿 kW(占发电装机总容量的 69.13%),水电装机 2.8 亿 kW(占发电装机总容量的 22.45%),核电 1461 万 kW(占发电装机总容量的 11.7%),并网风电 7548 万 kW,并网太阳能发电装机容量 1479 万 kW,新能源和可再生能源发电装机占比 31%。全国年发电量为 52451 亿 kWh,其中火电发电量 4.19 万亿 kWh(占总发电量的 80%),水电发电量 8963 亿 kWh(占总发电量的 17%),核电发电量 1121 亿 kWh(占总发电量的 2.1%),并网风电发电量 1401 亿 kWh。全国发电设备总装机容量和发电规模均位居世界第一位。

2011—2020 年,我国全社会用电量将保持 7.2% 以上的增速。预计 2020 年电能占用能比重约为 28%,全社会用电量达 8.4 万亿 kWh,中东部 12 省用电占全国比重 51%。

从电源结构调整来看,今后中西部应建大型坑口电站,采用发热量低的煤矸石综合利用发电。除了热电联产项目,东部地区原则不上新的煤电项目,其电力缺口要靠外来电、天然气、核电等方式解决,但长远来看仍要发展清洁高效煤电。

“十三五”期间,可再生能源要进一步优化发展。要积极发展水电,“十二五”水电装机目标为 2.9 亿 kW,“十三五”装机目标为 3.5 亿 kW;2015 年风电装机目标为 1 亿 kW,2020 年为 2 亿 kW;2015 年太阳能装机目标为 3500 万 kW、2020 年装机目标为 1 亿 kW;天然气 2020 年目标为 600 亿到 1000 亿 m³,占比 10% 以上;福岛核事故之后,我国核电装机目标下调,核电 2020 年装机目标为 5800 万 kW。

各种能源科技实现商业化的时序为,页岩气技术、智能电网技术将在 2018 年左右实现商业化;三代核电、海上风电也将于 2020 年前后成熟;风电将于 2020 年实现平价上网,光伏发电价格实现用户侧平价上网。

第一篇 火力发电厂动力部分

第一章 热力学基本概念与基本定律

【摘要】 本章内容分两部分。第一部分以系统为主线，集中介绍有关热力学基本概念。这部分内容是热力学中经常遇到的概念和术语，不熟悉它们，就无法学习后面的内容。

本章第二部分介绍热力学基本定律，即热力学第一定律和第二定律。这两条定律是工程热力学的两根支柱，前者确定了能量转换过程中的数量关系，后者着重解决能量转换过程的方向。学习中，需要注意理解它们的实质。

第一节 热力学基本概念

经典热力学研究问题的基本方法，就是将所研究的对象与其周围环境划分开来，集中研究对象内部的结构特性和物理状态的变化，以及它与周围环境的相互作用，因此热力学基本概念的定义都与其研究方法密切相关。

一、工质、热源和热力系统

热机：凡是能将热能转换为机械能的机器统称为热力发动机，简称热机。例如蒸汽轮机（也称蒸汽透平），内燃机（汽油机、柴油机等）等。

工质：热能和机械能之间的转换是通过一种媒介物质在热机中的一系列状态变化过程来实现的，这种媒介物质称为工质。在热力工程中往往依靠工质容积变化做功，因此要求工质有良好的流动性和膨胀性。如：火力发电厂用水蒸气作为工质，制冷装置用氨或其他制冷剂作为工质。

热源：在工程热力学中，把热容量很大且在吸收或放出有限量热量时自身温度及其他热力学参数没有明显改变的物体称为热源，其惟一作用是吸收或供给系统内工质热量。习惯上，向系统提供热量的热源称为高温热源，接收系统放热的热源称为低温热源或冷源。

系统：热力系或热力学系统（简称系统）是一个可识别的物质集团，其物理特性和可能产生的作用就是我们要研究的内容。系统总是由边界包围的，包围系统的边界叫做界面，界面之外就是外界。系统的划分非常灵活，完全取决于我们分析问题的目的和任务。系统可以是一个完全独立的体系，也可以是体系的某一局部；可以是一个固定的实体，也可以是一个流动变化着但被控制的流体集团。界面也一样，可以是实体，也可以是虚设的。

按照系统与外界之间的关系，可以将系统分为如下几种类型。

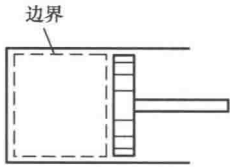


图 1-1 封闭系示意图

(1) 封闭系：与外界之间不存在物质交换的系统，叫做封闭系统（如图 1-1 所示），简称封闭系。

(2) 开口系：与外界之间既存在物质交换，也存在能量交换的系统，叫做开口系统（如图 1-2 所示），简称开口系，也叫控制体。

(3) 绝热系：与外界之间不存在热交换的系统，叫做绝热系。因世界上没有完全热绝缘的物质，故完全的绝热系是不存在的。提出这一理想概念，主要是为便于分析问题。热力工程中的许多设备，如汽轮机、水泵等，其散热损失很小，一般忽略不计，可近似地认为是绝热系。

(4) 孤立系：与外界之间既无物质交换，也无能量交换的系统叫做孤立系。一个系统与其外界的组合，就构成一个特殊的孤立系。孤立系也是一个理想概念。

二、工质的热力学状态及其状态参数

1. 基本概念

(1) 热力学状态：系指热力系统中工质在某一瞬间所呈现的物理状况。这种状况一般用热力学状态参数及其平面坐标图（如 $p-v$ 图、 $T-s$ 图等）进行描述。

(2) 平衡状态：简称平衡态。在外界条件不变的情况下，即使经历较长时间，系统的宏观特性仍不发生变化，我们称系统处于平衡状态。经典热力学所研究的热力学状态都是平衡状态。

(3) 状态参数：热力学参数通常叫做状态参数，是描述系统平衡状态的宏观物理量。一般用两个相互独立的状态参数就可以确定系统的一个状态。

状态参数大致可以分为基本参数和导出参数两种，前者可以直接测量而得，如温度、压力等，后者一般不能测量，只能用基本参数依据某种关系推导而得，如比热力学能、比焓、比熵等，以后将陆续介绍。

(4) 状态方程：在平衡状态下，系统的某一参数与独立于它的另一参数之间有着确定的联系，将这种联系表达出来的数学方程式就是状态方程，如 $p v = R T$ 就是理想气体的状态方程。利用状态方程可以求解系统在某一状态下的状态参数。

2. 基本状态参数

(1) 温度：国际单位制中，温度的测量采用热力学温标，此温标下的温度称为热力学温度，符号为“ T ”，单位为开尔文（K）。热力学温度与摄氏温度 t 之间的关系是

$$T = t + 273.15(\text{K}) \quad (1-1)$$

(2) 压力：在国际单位制中，压力的单位为帕斯卡（Pa）。工程上常用 MPa（ 10^6Pa ）作为压力单位。

过去我国使用工程大气压（at）和液柱（汞柱或水柱）高度作为压力单位，现已废止不用，遇到这些压力单位时，应按下列关系换算成 Pa 单位：

$$1 \text{at} = 1 \text{kgf/cm}^2 = 98067 \text{Pa}$$

$$1 \text{mmHg} = 133.321 \text{Pa}$$

$$1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.8067 \text{Pa}$$

实际压力测量中，压力表的读数是所测系统实际压力 p 与当地大气压力 p_{amb} 的差值。

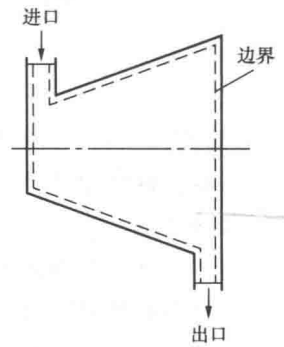


图 1-2 开口系示意图

习惯上,称系统的实际压力 p 为绝对压力。当绝对压力高于当地大气压力时,称测量仪表的读数为表压力 p_e ;当绝对压力低于当地大气压力时,称测量仪表读数为真空或负压 p_v (绝对值)。几者之间的关系由图 1-3 所示,其数学关系为

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

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

在工程应用中,常用 p 表示表压力。

(3) 比体积 (比容): 单位质量物质所占有的体积称为比体积,以符号 v 表示,单位为 m^3/kg 。根据定义,比体积与密度 ρ (kg/m^3) 互为倒数。

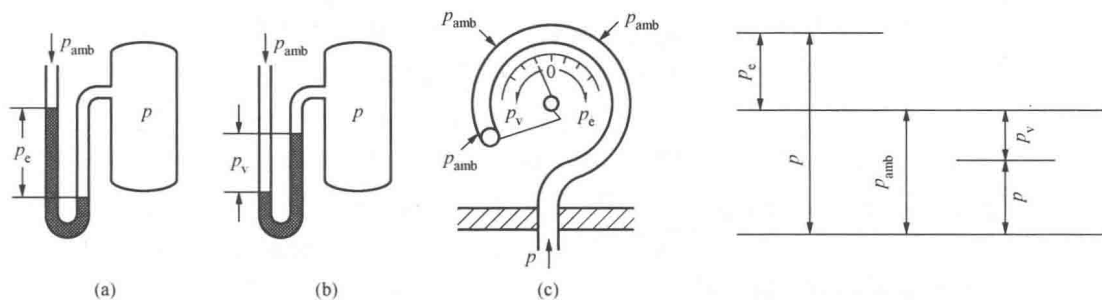


图 1-3 绝对压力、大气压力、表压力的关系

三、状态的改变

系统即使处于稳定平衡状态,一旦外界条件改变,其平衡状态也会遭到破坏,从而引起状态变化,这就涉及“过程”概念。

(1) 过程。系统由其初始平衡态,经过一系列中间状态而达到某一新的平衡态的变化过程称为热力过程,简称过程。

(2) 准静态过程。虽然过程的实现是平衡状态被破坏的结果,但可以设想这样的过程:在其进行的每一中间状态,既离开平衡态,又无限接近于平衡态,称这种状态为准静态或准平衡态,而经历一系列准静态变化所实现的过程叫做准静态过程。

(3) 可逆过程。系统完成某一过程之后,若能够沿原路径返回其初始平衡态,且系统和外界均不留下任何宏观的变化痕迹,则称该过程为可逆过程;反之则为不可逆过程。实际中的热力过程都是不可逆过程,因为过程中存在着各种各样的能量损失,系统与外界不可能不留下变化而返回到初始状态。显然,可逆过程只是一种抽象化的理想热力过程。

(4) 循环。系统经历了若干不相重复的过程,最后又回到初始状态所形成的封闭过程叫做热力循环,简称循环。如果构成循环的诸过程都是可逆的,则称该循环为可逆循环;否则称为不可逆循环。循环若是按顺时针方向进行,其循环结果是系统对外界输出净功,则称其为动力循环;反之称为制冷循环。

第二节 热力学第一定律

一、热力学第一定律的实质与表述

热力学第一定律就是能量转换及守恒定律在热现象上的应用。这个定律可广泛用于热能

和各种能量之间的转换，但工程热力学着重研究热能和机械能的转换。

根据研究者不同的着眼点，热力学第一定律有不同的表述，这里给出两种。

说法一：热可以变为功，功也可以变为热。一定量的热消失时，必产生与之数量相当的功；消耗一定量的功时，也必出现相应数量的热。

说法二：对于任何一个系统，输入系统的能量减去输出系统的能量，等于系统储存能量的增加。

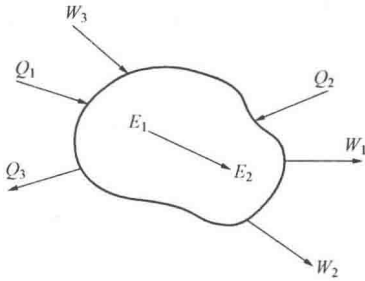


图 1-4 多输入和多输出的系统示意

二、热力学第一定律解析式

图 1-4 所示为具有多股热量 ($Q_i, i=1\sim n$) 和功 ($W_i, i=1\sim n$) 输出、输入的任意系统，其输入、输出的变化结果，是系统内储存的能量由 E_1 变为 E_2 。按照热力学第一定律的说法二，应有

$$Q_1 + Q_2 + W_3 - Q_3 - W_1 - W_2 = E_2 - E_1$$

$$\text{即 } (Q_1 + Q_2 - Q_3) - (W_1 + W_2 - W_3) = E_2 - E_1$$

该式中，若以 $Q = \sum Q_i$ 表示系统与外界交换的总热量，以 $W = \sum W_i$ 表示系统与外界交换的总功， $\Delta E = E_2 - E_1$

表示系统内储存能量的增加值，则

$$Q - W = \Delta E \quad (1-4)$$

写成微元形式为

$$dQ = dW + dE \quad (1-5)$$

或以单位质量表示

$$q = w + \Delta e \quad (1-6)$$

以上式 (1-4)~式 (1-6) 均称为热力学第一定律解析式，它们在不同的系统中又有着不同的具体表现形式。

三、热力学能、封闭系的第一定律表达式

封闭系与外界之间无物质交换，又假定所研究的封闭系处于宏观静止状态，即不考虑系统动能和势能的变化，则热力学第一定律的解析式为

$$Q = W + \Delta U \quad (1-7)$$

$$q = w + \Delta u \quad (1-8)$$

式 (1-8) 说明，对于任意的封闭系，输入系统的热量被分成了两部分，一部分用于与外界交换的功，一部分则成为系统内部能量的变化。此时，人们称系统所做的功为膨胀功，而将 ΔU (或 Δu) 叫做系统热力学能的改变。

将式 (1-7) 写成微元形式为

$$dU = dQ - dW \quad (1-9)$$

这就是说， dU 是系统从外界得到的净能量，它不会自行消失，必然以某种方式储存在系统之中，这种储存的能量，就叫做热力学能。热力学能是一个状态参数，其单位与过程量功和热的单位相同 (J 或 J/kg)。

四、焓、开口系的第一定律表达式

1. 稳定流动

稳定流动是流动过程的一种特殊情况，它满足以下条件：流入和流出系统的质量流量不