

高等学校教材

发电厂动力部分

华北电力大学 关金峰 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书为普通高等学校电力工程专业教学指导委员会推荐使用教材。

本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，供复习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂动力部分/关金峰主编.-北京：中国电力出版社，1998

高等学校教材

ISBN 7-80125-552-6

I. 发… I. 关… 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(98)第03880号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京鑫正大印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998年9月第一版 1998年9月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 14.5印张 324千字
印数 0001—5360册 定价 13.50元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前 言

《发电厂动力部分》是根据全国普通高等学校电力工程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错误，恳请广大师生和读者给予批评指正。

编 者

1997年9月

目 录

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	6
§ 1-1 热力学基本概念	6
§ 1-2 热力学第一定律	8
§ 1-3 热力学第二定律	11
本章小结	13
思考题	14
习 题	14
第二章 水蒸气及其动力循环	15
§ 2-1 水蒸气的定压形成过程及图表应用	15
§ 2-2 水蒸气的典型热力过程	19
§ 2-3 水蒸气动力循环	22
本章小结	30
思考题	30
习 题	31
第三章 热传递的基本原理	33
§ 3-1 导热	33
§ 3-2 对流换热	38
§ 3-3 辐射换热	43
§ 3-4 传热过程与换热器	46
本章小结	52
思考题	52
习 题	53
第四章 锅炉设备	54
§ 4-1 电厂锅炉概述	54
§ 4-2 燃料的成分及特性	57
§ 4-3 煤粉及其制备系统	59
§ 4-4 煤粉燃烧及燃烧设备	64
§ 4-5 锅炉受热面	68
§ 4-6 锅炉的主要辅助设备	76
本章小结	78

思考题	78
第五章 电厂锅炉运行	80
§ 5-1 锅炉热平衡	80
§ 5-2 锅炉的运行调节	82
§ 5-3 锅炉启动和停炉	85
§ 5-4 HG-2008/18.2-HM3 型锅炉设备典型简介	87
本章小结	88
思考题	89
第六章 汽轮机设备	90
§ 6-1 汽轮机的一般概念	90
§ 6-2 汽轮机本体主要结构	93
§ 6-3 汽轮机级内工作过程	101
§ 6-4 汽轮机的损失、效率和功率	104
§ 6-5 汽轮机的主要辅助设备	107
本章小结	113
思考题	114
第七章 汽轮机运行	115
§ 7-1 汽轮机的调节与保护	115
§ 7-2 汽轮机运行基本知识	121
§ 7-3 典型凝汽式汽轮机设备简介	123
本章小结	124
思考题	125
第八章 凝汽式发电厂的生产系统及热经济性	126
§ 8-1 凝汽式发电厂的热力系统	126
§ 8-2 发电厂供水系统	130
§ 8-3 凝汽式发电厂的热经济性评价	132
本章小结	137
思考题	137

第二篇 水力发电厂动力部分

第九章 水力学基础和水力发电开发利用方式	138
§ 9-1 我国水利水电开发状况和水电开发方针	138
§ 9-2 水能资源特征和水力发电基本原理	141
§ 9-3 水力学基础知识和水流的水能计算	143
§ 9-4 水资源开发方式和水电厂基本类型	148
本章小结	153
思考题	153
第十章 河流径流调节和水电厂装机容量的选择	155
§ 10-1 河流径流和径流调节	155
§ 10-2 水电厂的特点及其在电力系统中的运行方式	158

§ 10-3 水电厂装机容量的选择和主要技术经济指标	160
本章小结	166
思考题	167
第十一章 水电厂主要水工建筑物和动力设备	169
§ 11-1 水电厂主要水工建筑物	169
§ 11-2 水轮机	172
§ 11-3 水轮机工作原理及效率	184
§ 11-4 水电厂的主要辅助设备	188
§ 11-5 水轮机转速调节和运行	189
本章小结	192
思考题	193

第三篇 原子能发电厂动力部分

第十二章 原子能发电厂动力设备及运行	195
§ 12-1 核能发电基本知识	195
§ 12-2 压水堆核电厂及其一般工作原理	201
§ 12-3 核电厂辐射防护和三废处理	209
§ 12-4 核电厂运行维护基本知识	212
本章小结	215
思考题	216
附录	218
附表 I 饱和水与干饱和蒸汽表 (按压力编排)	218
附表 II 饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度编排)	219
附表 III 未饱和水与过热蒸汽简表	220
附表 IV 干空气的热物理性质 (大气压力 $p_{amb} = 101325\text{Pa}$)	222
附表 V 水的热物理性质	222
参考文献	223

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、氘等原子核能，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、氘等原子核能燃料，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“非再生性能源”。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“再生性能源”。

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，愈来愈多地被当作宝贵的化工原料使用，世界各国不再毫无限制地把它们当作能源消耗掉，而劣质煤、水力、原子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、太阳辐射能和原子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，能实现有效而精确的控制，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，国民经济的高速发展是不可能的。

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，发电厂可分为不同类型的，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，燃煤电厂占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“九五”期间，将致力于优先发展坑口电厂（如山西、陕西、内蒙、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，灰渣作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而凝结成水。

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)。

水电站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站内的水轮机,驱动水轮机旋转,水能便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站,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。水电站装机容量的大小,水电站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。人类利用核能发电是在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12-3),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心,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心,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。本教材第十二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（当时世界第 21 位）和 43.1 亿 kW·h 年发电量（当时世界第 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，全国年发电量已达到 1 万亿 kW·h，仅次于美国而跃居世界第二位；全国发电设备总装机容量达 2.1 亿 kW，居世界第三位。其中，装机容量从 1987 年末的 1 亿 kW 到 1995 年 3 月突破 2 亿 kW，前后只用了七年多时间，这在世界电力发展史上是极少有的。

我国电力工业的飞速发展，还体现在电网容量、电厂规模和单机容量大幅度提高上。到 1995 年末，我国华东、东北、华北和华中四大电网的容量均超过或接近 3000 万 kW；100 万 kW 级的大型发电厂已达 42 座（火电厂 32 座，水电厂 9 座，核电厂 1 座），其中 60% 的大型电厂（25 座）都是在深入改革开放的“八五”期间建成投产的。首台国产 600MW 火力发电机组于 1989 年投入商业运营，到 1987 年，我国拥有最大规模的火力发电厂总装机容量 1625MW。到 1989 年，已投入运营的最大水力发电机组为单机 320MW，并在“七五”期间建成了目前最大规模水电厂，总装机容量 2715MW（葛洲坝水电厂，1988 年）。我国核电工业起步较晚，自行设计、制造、安装、调试的 300MW 压水堆核电机组，1991 年首次并网发电（浙江秦山核电厂），实现了核电厂零的突破。引进 2×900MW 压水堆核电机组，1994 年投入运营（广东大亚湾核电厂），其安装、调试和运行管理等方面，都达到了世界先进水平，是我国目前最大的核能发电厂，标志着我国的核电事业迈入了一个新的发展阶段。

科学技术的进步，中央和地方、国内和国外多方筹措电力建设资金发挥办电的积极性，我国第一部《电力法》的正式颁发，为 20 世纪最后五年——我国“九五”期间的电力发展事业注入了新的活力。按照“九五”期间我国电力工业发展的目标，规划以 300MW、600MW 火电机组为主干，进一步发展 800MW、1000MW 和 1300MW 的大型火电机组，优先发展坑口电厂，适当建设港口、路口电厂，在负荷中心区域建设一批 4000~5000MW 的大规模

发电厂。以总装机容量 18200MW 的长江三峡水力枢纽工程建设为龙头，坚持滚动、流域、梯级、综合开发的水力建设方针，加速我国的水电厂建设步伐。在沿海和燃料短缺的地区，加速建设一批占地面积少，节省人力和燃料，不污染环境的大型核电厂。这一符合我国国情的规划目标，将使我国的电力工业走向低能耗结构、低环境污染、高效率运营的健康发展道路。

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，就无法学习后文的内容。

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。

§ 1-1 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、系统及其类型

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、但被控制着的流体集团。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：

(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，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，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、系统所处物理状态的描述

1. 基本概念

(1) 热力学状态：系指系统即时的存在状态。这种状态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) 热力学参数：通常叫做状态参数，是描述系统所处状态的物理量。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，如内能、焓、熵等。

(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 $pv=RT$ 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：

$$T = t + 273(K) \quad (1-1)$$

(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 10^6Pa （MPa）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，压力表计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。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，称测量表计的读数为表压力 p_e ；当绝对压力低于当地大气压力时，称测量表计读数为真空或负压 p_v （绝对值）。几者之间的关系由图 1-1 表达，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) 比容：单位质量物质所占有的容积称为比容（国标中改称质量体积或比体积），以符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。根据定义，比容与密度（国标中称体积质量） ρ (kg/m^3) 互为倒数。

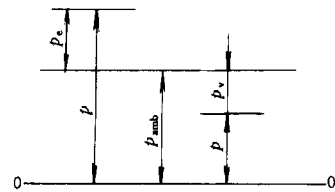


图 1-1 绝对压力、大气压力、表压力的关系

三、系统状态的改变

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，这就涉及到“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，可逆过程只是一种需要的想象。

(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。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。

四、系统与外界的作用

系统的价值在于它与外界进行物质、功和热的交换，最终完成人们所期望的某种变化，这就是与外界的作用。除孤立系之外，一切系统都会与外界发生作用，这就涉及工质和热源的概念。

(1) 工质：系统与外界的能量交换（包括做功和传热）是通过系统内某种物质的一系列状态变化过程而实现的，人们将这种用以实现系统与外界能量交换的媒介物质称为工作介质，简称工质。这样，上述所有有关系统的概念，如系统状态、状态参数、过程等，均指系统内工质所属，如工质的状态等。热力工程中，能够作为工质的一般是具有良好流动性和膨胀性的气体（含水蒸气）。

(2) 热源：热源是这样的实体：具有固定的容积，处于稳定的平衡状态，具有无限大的热容量，无论向它输入或吸取多少热量，都不会引起它的温度变化，其唯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。

§ 1-2 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。

二、热力学第一定律解析式

图 1-2 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、输入的任何系统, 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

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

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

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) 至式 (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。

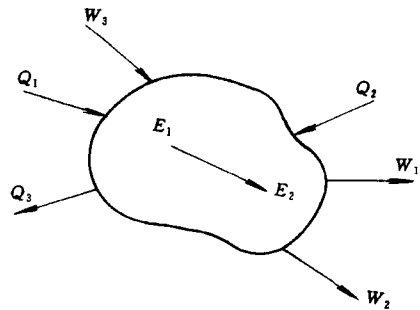


图 1-2 多输入和多输出的系统示意

三、内能、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

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

或

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

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) 叫做系统内能的改变。

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, 就叫做内能。内能是一个状态参数, 其单位与过程量功和热的单位相同。

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随时间变化; 系统任何一点的参数和流速不随时间变化; 系统内的储存能不随时间变化;

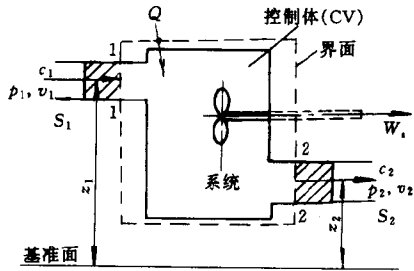


图 1-3 开口系稳定流动示意图

单位时间内加入系统的热量和系统对外所做的功也不随时间改变。很多实际的流动过程可以作为稳定流动过程处理。

2. 稳定流动能量方程

工质在开口系的稳定流动如图 1-3 所示，以 $E_k = \frac{1}{2}mc^2$ (m 为质量， c 为流速) 表示宏观动能； $E_p = mgz$ (g 为重力加速度， z 为地理高度) 表示宏观势能。按照图示所取定的系统和给定的符号，将热力学第一定律解析式 (1-7) 用于该开口系统，则有

$$Q - W = \frac{1}{2}m(c_2^2 - c_1^2) + mg(z_2 - z_1) + \Delta U \quad (1-10a)$$

式中 W 应由下列部分构成：

(1) 工质流经系统时对外输出的轴功 W_s 。(如蒸汽流过汽轮机时所做的内功)。

(2) 由于在进口截面 1-1 处原已充满工质，其压力为 p_1 ，比容为 v_1 ，欲使 mkg 工质流入系统，必须用力 p_1S_1 (S_1 为进口横截面积) 克服阻力，把工质推入系统，此时外界对系统做出推动功 $p_1S_1l_1 = p_1V_1 = mp_1v_1$ (式中 V_1 为体积， l_1 为 p_1 推进距离)，否则工质无法流入系统；同理，当 mkg 工质流出系统时，必须对外界做出推动功 mp_2v_2 。 p_1v_1 称为 $1kg$ 工质的推动功或流动功。因此，系统与外界所交换的功为

$$W = W_s + p_2V_2 - p_1V_1 = W_s + \Delta(pV) \quad (1-10b)$$

将上式代入式 (1-10a) 并改写成

$$Q = \Delta U + \Delta(pV) + \frac{1}{2}m\Delta c^2 + mg\Delta z + W_s \quad (1-10c)$$

$$\text{令} \quad \Delta H = \Delta U + \Delta(pV) \quad (1-10d)$$

则式 (1-10c) 成为

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2}m\Delta c^2 + mg\Delta z + W_s \quad (1-10)$$

写成单位质量形式为

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta z + w_s \quad (1-11)$$

式 (1-10)、式 (1-11) 就是稳定流动的能量方程，也就是开口系的热力学第一定律解析式。式中的 Δh (或 ΔH) 称为系统焓的变化，称 H 为焓， h 为质量焓或比焓。由定义知

$$h = u + pv \quad (1-12)$$

因为 u 、 p 、 v 均为状态参数，所以焓也是状态参数，其单位与内能相同。焓是蒸汽动力循环计算与分析时使用最多的一个状态参数。

在某些场合，宏观动能和宏观势能的变化可以忽略不计，则此时的开口系能量方程成为

$$q = \Delta h + w_s \quad (1-13)$$

假如流动过程中系统与外界不产生功的交换或热的交换，则上式还可相应简化。

§ 1-3 热力学第二定律

一、熵、自然过程的方向性

无论是热力学第一定律，还是内涵更为广泛的能量转换与守恒定律，都只是指出了能量之间可以相互转换，以及转换过程中的数量关系，而没有指明此种能量与他种能量相互转化的差异，比如说哪个转化方向更“轻而易举”。

事实上，一切自然过程都是有方向性的，如热可以自发地从高温物体传向低温物体，但反过来却不可能；转动的飞轮会由于摩擦而停止，摩擦使动能转变成热能而耗散于大气，但却不能加热飞轮而使其恢复转动；压力、温度及成分不同的几种气体可以自然地混合，其各项参数会变得均匀一致，但却不能再自发地恢复到原来的分离状态。如此种种，集中说明了一个问题，就是自然过程都具有方向性，过程能够非常容易地向着自发的方向进行，但却不能不付代价地恢复到原来状态。

状态参数熵给出了自然过程方向性的定量描述。熵的概念由下面的微分式来定义，即

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-14)$$

式中， dQ 为系统从温度为 T 的热源中可逆地吸取的热量。所以说，熵就是在可逆的条件下，传入系统的微元热量 dQ 与热源温度 T 的比值。理论证明了熵确实是一个状态参数，单位质量熵（符号 s ）的单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

从物理意义上解释，熵是无序性的度量，是系统紊乱程度的表征。对于气体和一般流体，它表征分子热运动的混乱程度。可以这样说，系统越纷乱无序，其熵值也就越大。自然过程所呈现的方向性实质，说明自然界的事物总是自发地从概率小的方向向概率大的方向转化，也就是从有序到无序、从比较有规则向无规则过渡。所以说，自然过程总是向着熵增加的方向进行的。

二、热力学第二定律、熵增原理

如前所述，热力学第一定律指出了不同能量形式之间转化的可能性，但它没有揭示这种转化的方向性和转化的深度。热力学第二定律是能量转化规律更为深化的定律，它指出了一切自然过程的不可逆性。

同热力学第一定律一样，热力学第二定律也是建立在长期无数经验积累基础之上的，由于自然过程的多样性，所以从不同的现象出发，就总结出不同的热力学第二定律的表述方法。这里给出两种典型的说法。

说法一：热不可能自发地、不付代价地从低温物体传向高温物体。

说法二：只冷却一个热源而连续做功的循环发动机是造不成功的。

两种说法表面看起来似乎互不相关，但其本质是一样的，这就是：一切自发过程都是不可逆的。热从高温传向低温、功转变为热都是不可逆的自发过程，要使其反方向进行，必须付出代价。热力学第二定律的定量描述就是著名的熵增原理。