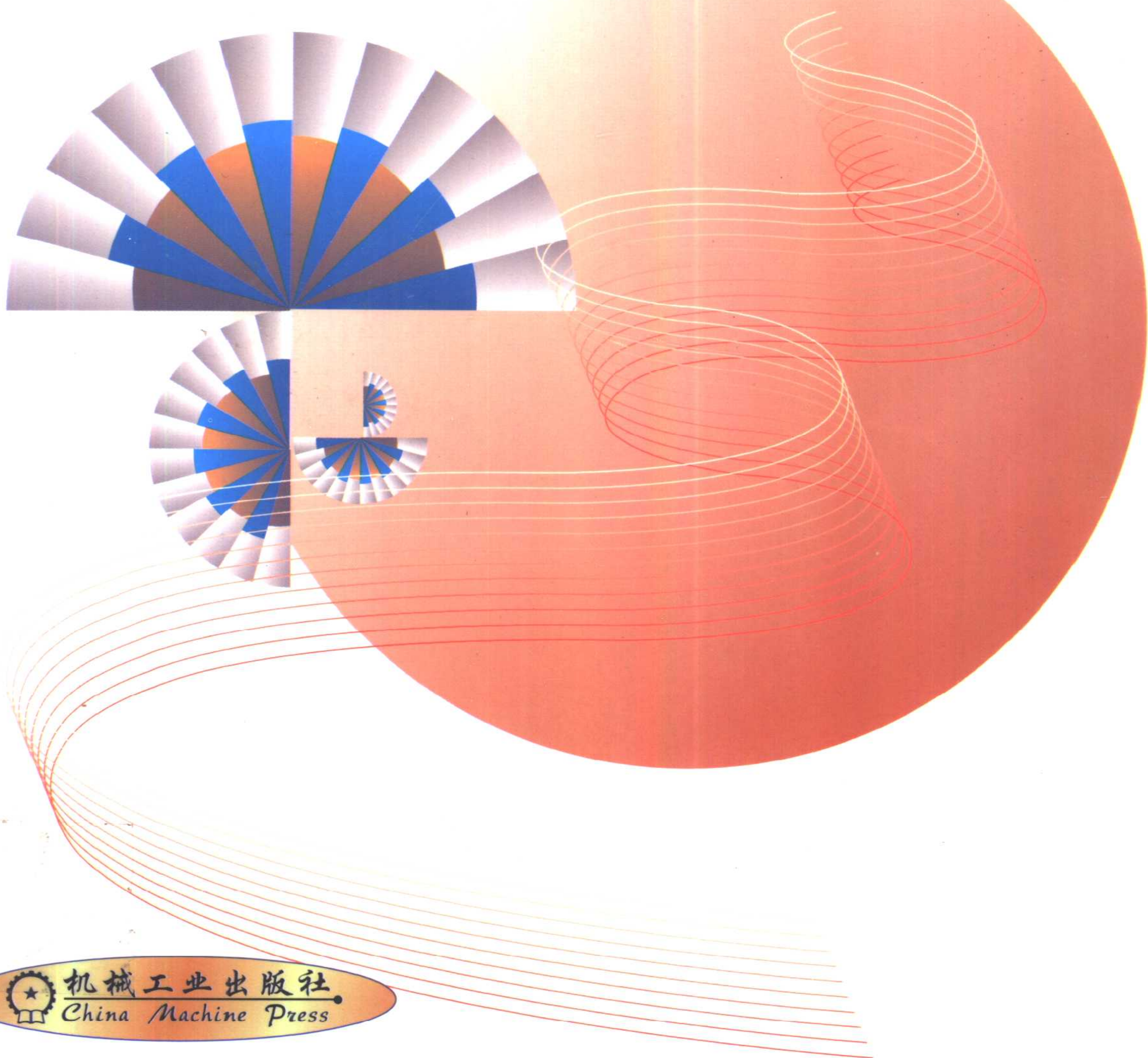
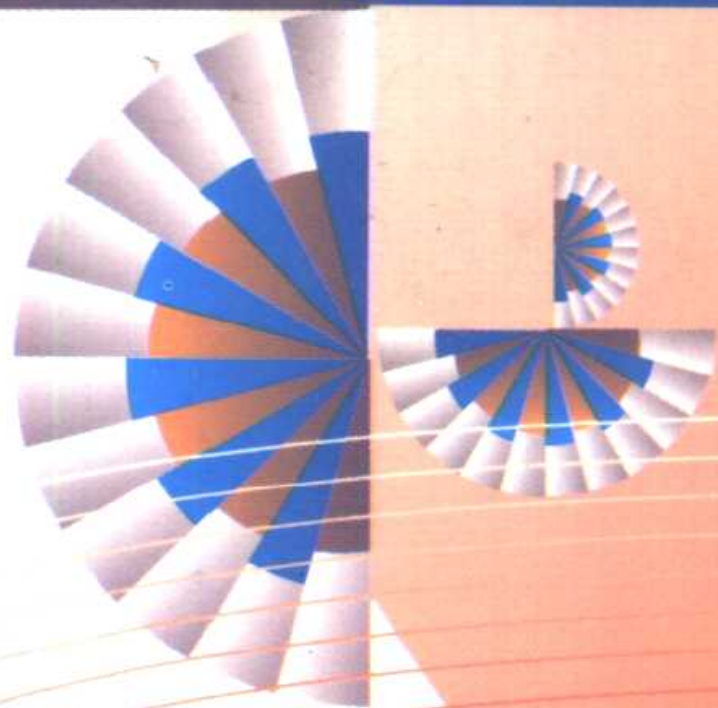


13

普通高等教育机电类规划教材

热能与 动力机械基础

王中铮 主编



北京)

43



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

热能与动力机械基础

主编 王中铮

参编 (按姓氏笔划为序)

刘 宁 李惟毅 赵 军

陶正良 惠世恩

主审 徐通模

机械工业出版社

本教材系热能与动力工程类专业的技术基础课教材(必修),其目的是使热能与动力工程类专业的学生对热能利用原理与基本系统和主要装置、动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能有一总体和基本的认识。全书内容包括基本概念、内燃动力系统与装置、涡轮机及喷气发动机、锅炉及换热器、热力发电原理与系统、制冷与空调、新能源利用(含太阳能、地热能、风能、潮汐能、燃料电池及低温核供热)、动力机械辅助装置等八章。

本书着重阐述基本原理和系统,并在包含常规内容的基础上适当反映近期的科技发展。全书内容体现突出基础、覆盖知识面宽、体系完整、结构严谨的特点,是国内目前有关热能利用和动力机械方面内容最为全面、系统的一本教材。它不仅适合于作热能与动力工程类专业的必修教材,而且可作为相关专业(如化工、暖通、汽车拖拉机等)的参考教材;对于从事能源利用、动力、化工及暖通等方面的科技人员也是一本很好的科学技术读本。

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力机械基础/王中铮主编. —北京:机械工业出版社,2000. 5
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07592-7

I. 热… II. 王… III. ①热能-高等教育-教材
②动力机械-高等教育-教材 IV. TK11

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第06540号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:赵爱宁 版式设计:霍永明 责任校对:张佳
封面设计:姚毅 责任印制:何全君
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2000年4月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·13.5印张·1插页·328千字
0 001—3 000册
定价:19.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

本书为全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会审订通过的“九五”规划教材。

为适应 21 世纪培养人才的需要和满足加强基础、拓宽知识面的要求，全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会在研讨了热能与动力工程类专业教学计划的基础上，要求编写一本《热能与动力机械基础》，作为该类专业的技术基础课教材（必修）。本书旨在使热能与动力工程类专业的本科生对热能利用原理与基本系统和主要设备、动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能有一总体和基本的认识，为继续深入学习某一专业方面的知识和适应毕业后工作的需要奠定基础。为此，在本书内容的组织和编写中，在拓宽知识面的同时，注意加强基础和系统性，以构成一个完整的科学体系；并且适当联系实际和科学技术的新进展，以开阔视野和启发创新。

本书由天津大学王中铮教授主编。各章编写分工为：绪论及第一章，王中铮；第二、八章，天津大学刘宁；第三章，上海理工大学陶正良；第四章，西安交通大学惠世恩；第五章，天津大学李惟毅；第六、七章，天津大学赵军。全书由西安交通大学徐通模教授主审。

鉴于本书系编者适应热能与动力工程类专业的需要而编写的一本新教材，内容涉及面很广，而作为一本技术基础课教材应突出这一大类专业面的共性和各专业面基础性的内容，既要有一定的深度，又要避免过分专业化，此外又受到字数的限制，使编写有相当大的难度。所以，本书只能作为编者在教学改革基础上编写新教材的一次尝试，加之编者水平有限和时间仓促，书中不可避免地会有不少缺点和错误，竭诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论	1
第一章 基本概念	3
第一节 热能及其利用	3
第二节 能量转换与利用的基本定律	5
第三节 能源的有效利用与评价	9
第四节 动力机械与动力传动	16
第五节 热能与动力技术和环境	18
思考题和习题	20
参考文献	21
第二章 内燃动力系统与装置	22
第一节 内燃机的工作原理与组成	22
第二节 内燃机的热力循环及性能 指标	26
第三节 内燃机的换气过程	35
第四节 内燃机的燃料供给与燃烧 过程	39
第五节 内燃动力系统的运行特性	46
第六节 内燃机的排气净化	49
思考题和习题	51
参考文献	52
第三章 涡轮机及喷气发动机	53
第一节 概述	53
第二节 热力涡轮机级的基本理论	58
第三节 涡轮机级的损失与效率	65
第四节 多级涡轮机	71
第五节 火箭及喷气发动机	78
第六节 水轮机概述	83
思考题和习题	87
参考文献	88
第四章 锅炉及换热器	89
第一节 锅炉概述	89
第二节 锅炉燃料与热平衡	94
第三节 锅炉燃烧设备	100
第四节 锅炉受热面	110
第五节 换热器	117

思考题和习题	133
参考文献	133
第五章 热力发电原理与系统	134
第一节 热力发电基本循环	134
第二节 现代热力发电循环	136
第三节 电厂热力系统及热经济性 指标	139
第四节 新型动力循环	147
第五节 磁流体发电	154
第六节 核能发电	157
思考题和习题	159
参考文献	160
第六章 制冷与空调	161
第一节 制冷循环	161
第二节 蒸气压缩式制冷系统	165
第三节 吸收式制冷系统	171
第四节 热泵	176
第五节 空调系统	178
第六节 制冷压缩机	182
思考题和习题	184
参考文献	185
第七章 新能源利用	186
第一节 太阳能热利用	186
第二节 地热能利用	192
第三节 燃料电池	195
第四节 其他新能源利用	198
思考题和习题	201
参考文献	201
第八章 动力机械辅助装置	202
第一节 概述	202
第二节 泵	203
第三节 风机	206
第四节 泵与风机的运行	208
思考题和习题	210
参考文献	210

绪 论

热能是最早被人类认识和利用的能量形式之一。从古代的钻木取火到现代的自动点火,从18世纪的蒸汽机至20世纪的火箭发动机,无不展现了热能利用与社会发展、科技进步的密切关联。能源是人类社会赖以生存与发展的重要物质基础,是推动国民经济发展的强大动力。自然界存在多种多样的能源,如煤炭、石油、天然气、油页岩、木材、水力以及太阳能、核燃料、地热能、潮汐能等等。这些能源资源可以直接或通过转换间接地被利用,为生产和生活服务。就现有的能量转换与利用技术而言,能源资源中除水力、潮汐能、风能等少数能源外,基本上都是直接地以热能的形式利用或间接地将热能转换成其他的能量形式进行多种方式的利用,如煤炭、石油一类矿物燃料的能源资源,可以通过燃烧将化学能转变成热能直接加以利用,或通过热力发动机转换成机械能,或再通过发电机转换成电能;核燃料(核能)的利用,可以通过核分裂或核聚变产生热能而直接加以利用,或再通过转换,进行核发电、磁流体发电或核聚变发电;太阳能的利用之一是光能转换成热能,用于洗浴、供暖、制冷等,或再转换成机械能进行太阳能热发电等;地热能,则可直接将地热水(或地热蒸汽)的热能用于供热,或直接、间接地用于地热发电等;海洋热能的利用,可通过热能 $\rightarrow$ 机械能 $\rightarrow$ 电能的转换,实现海水温差发电。如果把能源的利用从一次能源扩展到二次能源,诸如煤气、焦炭、汽油、酒精、沼气等等,它们中的极大多数也都是以热能的能量形式被直接或间接地利用。据统计,经过“热”这个环节而被利用的能量,在我国占90%以上,世界各国平均达85%以上。所以,上述情况充分表明热能是能源利用的最基本和最主要的能量形式。

人类的生存和社会的发展离不开动力,动力的发展和进步也同样标志着社会与科学技术的发展和进步。人类早期利用的动力是风力,在5000多年前人类就开始使用帆船。此后又掌握了用畜力和简单的水力从事生产活动。11世纪,荷兰人使用了风车泵水和碾谷。18世纪,蒸汽机的产生促进了第一次工业革命。19世纪,内燃机的崛起打破了蒸汽机动力的统治地位,并导致了汽车的产生和发展。19世纪末,蒸汽轮机的出现使火力发电得到了很快的发展,进而促进了工业生产的大发展。本世纪以来,随着科学技术的进步,多种多样的汽油机、柴油机、汽轮机、燃气轮机、喷气发动机、火箭发动机等新型动力机械相继出现,多种新型高效的动力循环及新能源(太阳能、地热能、风能、潮汐能等)动力装置应运而生。动力技术的发展促使全球经济得到迅速发展,当今的时代是一个与动力的应用和发展息息相关的时代。

鉴于热能在转换成其他形式的能量利用中往往是以动力的方式输出,如煤通过燃烧将物质的化学能转变成热能,然后将锅炉中的水加热成蒸汽,高温、高压的蒸汽推动汽轮机,以蒸汽动力的方式带动发电机;又如,汽油在内燃机中点燃,从而以内燃动力的方式拖动汽车。所以,热能工程和动力机械(动力工程)在能源利用中已结合成一个有机联系的整体。我国的能源资源种类广泛、储量丰富,下面列出我国几种与热能利用有关的能源资源状况。①煤炭。煤炭是我国的主要能源,蕴藏量居世界第三位,产量居世界第一位。②石油。建国以来,我国进行了大量的石油勘探、开发和建设工作,相继建立了大庆、胜利、大港等一批油田。我国的石油资源已探明储量为69.7亿t,占世界储量8%。近年来,又大力进行了海上探油与采

油工作，如胜利油田已建成我国在渤海湾浅海海域的最大油田——年产 105 万 t 的海上埕岛油田。③天然气。与油田、煤田相伴随，我国也有丰富的油系天然气和煤系天然气。天然气资源总量为 33.3 万亿 m^3 ，居世界第 16 位。预计到 2000 年时，我国天然气产量将达 250~300 亿 m^3 。④核能资源。原子核能是正在发展着的主要能源之一，通常所说的核能是指通过裂变反应使核燃料铀-235 发生裂变而释放出巨大的能量。现已探明，我国的铀矿储量达 7 万 t，居世界第 6 位。⑤油页岩。我国油页岩资源比较丰富，含油率一般为 5%，已探明的储量为 311.7 亿 t。

在动力机械与热发生及热传递装置方面，建国至今特别是改革开放以来，无论是在种类、容量和水平上都有了很大的发展和提高，今可列举数种以观全貌。①汽轮机。它已形成国产高、中、低参数及大、中、小容量的汽轮机系列。“八五”期间我国生产了锅炉—汽轮机发电机组 60 及 30 万 kW 共 74 套，标志着我国火电设备主力机组已完成由国内自行设计的 20~30 万 kW 机组，向引进优化型 30~60 万 kW 机组的过渡。②锅炉。它已形成与汽轮机配套的电站锅炉系列。我国已能自行设计、制造多种形式的余热锅炉及工业锅炉（参阅表 4-1 及表 4-2）。③内燃机。1995 年，全国内燃机总产量达 1600 万台，总功率达 2.2 亿 kW，从排量较小的摩托车发动机到货车、机车、船用等大型柴油机，如功率为 47280kW 的多缸低速船用柴油机、1980kW 的柴油发电机组、99kW 的多缸汽油机等，品种繁多，能满足各行业的动力需要。④燃气轮机。在燃气轮机的设计和制造方面也有了较大的发展，目前已能生产功率为 38MW 的成套燃气轮机发电机组。⑤核反应堆与核动力。近几年内，我国在核动力利用方面从无到有，有了显著的进展。现已建成秦山核电站一期 30 万 kW、广东大亚湾核电站，“九五”期间还将建设秦山二期、三期，广东岭澳及江苏连云港等四座核电站。2MW 的核反应低温供热系统也已投运多年，并正拟建新的核供热系统。⑥新能源利用系统与装置。通过“七五”和“八五”攻关，促进了我国在新能源方面的利用。例如，目前我国已利用的地热资源相当于 400 万 t 标准煤；天津在 1995 年初的地热供暖面积已达到约 200 万 m^2 ；西芷羊八井地热电站现有的装机容量达 2.5 万 kW。我国已建有的潮汐发电站总装机容量达 5030kW。太阳能的利用发展较快，尤其在太阳能热利用上，目前我国已成为世界上最大的太阳能热水器生产国，其产量约为世界各国产量之和。在风力发电方面，计划到 2000 年，我国风电场装机容量达 100 万 kW，目前已能生产 200kW 的风力发电机组。⑦换热器。除已能生产高、中、低压的管壳式换热器外，还能设计、制造螺旋板式、板式、板翅式、翅片管、微肋管、热管等多种新型、高效、紧凑的换热器。

上述情况表明，热能工程和动力机械（动力工程）在国民经济发展中占有重要的位置，是社会发 展所必不可少的工业部门。为了使在这一方面学习和工作的人员对本领域所涉及的理论和技术有一基本的认识，本书从奠定专业的技术基础和拓宽知识面这一基本思想出发，对热能利用原理与基本系统和主要设备，动力机械与动力系统的工作原理、组成、结构和性能给予概括的阐述，并结合介绍有关的高新科学技术知识。为此，全书的内容包含以下几部分：①基本概念。有关热能利用与动力机械在能量转换与利用的规律、系统、形式、性能、环境等方面的共同性技术基础内容。②典型的动力机械及系统：蒸汽轮机和燃气轮机、火箭及喷气发动机、内燃动力、热力发电、水轮机等。③典型的热发生（蒸汽、热水）及热传递装置：锅炉及换热器。④热利用：新能源热利用，制冷与空调（含压缩机）等。⑤系统辅助装置：泵和风机。

通过对本书内容的学习和掌握，将为读者进一步结合所从事的专业需要和深入进行专业课程的学习奠定基础。

第一章 基本概念

工程上有多种形式的热能利用装置和动力机械，但它们都属于能量的传递、转换和利用的设备，必遵循某些共同的规律和包含共同的内容。基于这一基本观点，本章主要简述有关热能利用装置和动力机械的共同性技术基础知识，并作为后续各章的导论。

第一节 热能及其利用

一、能量的形式

运动是物质存在的基本形式，而运动必然要伴随着能量的消耗或转换，所以整个世界或宇宙的存在是与能量及其使用紧密相关的。

人类很早就从风力、太阳的照射、水的流动认识到能的存在和作用，现代的科学技术和各种工业过程更反映出能的功用。简言之，所谓能量，就是产生某种效果或变化的一种能力。而且，产生某种效果或变化的过程必然要伴随着能量的消耗和转化。例如，煤燃烧发生热，在这一过程中，可燃物质的化学能以热能的形式释放。

能量的类型有多种，一般把它分为六种形式：①机械能。它包括物质的动能、势能、弹性能及表面张力能等。机械能常以功的形式来实现，并且能方便而有效地转换为其他形式的能。②热能。它是与构成物质的原子和分子的运动（振动）有关的一种能量。它的宏观表现是温度的高低。热能是一种基本的能量形式，所有其他能量形式都能完全转换为热能。③电能。它是和电子的流动和积累有关的一种能。电能可以静电场能或感应电场能的形式来贮存。电能的传递形式就是电流。电能也能方便而有效地转换为其他形式的能。④辐射能。因这是物体以电磁波形式发射的能量，故也称电磁能。这种能量仅以传递如光速变迁能量的形式存在。辐射能常依电磁波的波长分为几种不同的电磁射线，通常可分为 γ 射线、X射线、热辐射、微波和毫米波射线及无线电波。其中，热辐射是一种由原子振动而产生的电磁能，包含紫外线、可见（光）射线和红外线，因它们的辐射强度与物质的温度有关，而且常常会产生热效应，故称为热辐射。⑤化学能。这是一种仅以贮存能的形式存在的能量，当不同物质的原子和（或）分子相结合时释放出来。例如，燃料燃烧就是物质间发生放热的化学反应，使化学能转换成热能。所以，按照化学热力学的定义，化学能就是物质或物系在化学反应过程中以热能形式释放的内能。⑥核能。核能（原子能）又是一种仅以贮存能形式存在的能量形式。它是蕴藏在原子核内部的能量，又称核内能，在粒子相互作用或原子核中的粒子相互作用，即发生原子核反应时释放出来。原子核反应通常有放射性衰变、核裂变和核聚变三种类型，其中核裂变和核聚变反应可释放大量能量，有广阔的应用前景。

二、能源及其分类

上述各种能量都可以直接或通过转换而获得。所谓能源就是能够直接或经过转换而获取某种能量的自然资源。能源按其形成和来源大致可分为三大类。第一类来自太阳的能量。除了直接的太阳辐射能之外，煤炭、石油、天然气以及生物质能、水能、风能、海洋能等都是

间接地来自太阳能。第二类是来自地球本身的能量。其中包含以热能形式储藏于地球内部的地热能（如地下热水、地下蒸汽、干热岩等）以及地球上铀、钍等核燃料所具有的能量（即原子能）。第三类是月球和太阳等天体对地球引力作用所产生的能量，如潮汐能就是以月球引力为主所产生的一种能量。

因能源的不同，能源的消耗、能量的转换或利用也可能有所不同。对能源还有其他几种分类方法。凡自然界现已存在的、并可直接取得而不改变其基本形态的能源，称为一次能源，如煤炭、石油、天然气、水能、生物质能、地热能、风能、太阳能等。由一次能源经过加工或转换而成为另一种形态的能源产品，称为二次能源，如电力、蒸汽、焦炭、煤气、氢气、各种石油制品等等。此外，在生产过程中排出的余能、余热，如高温烟气、可燃废气、排放的乏汽和有压流体，也属于二次能源。一次能源还可按它们是否能够无穷无尽地利用而分为两类，一类是可再生能源，即可以不断再生并有规律地得到补充的能源，如水能、太阳能、生物质能、风能、海洋能等，它们是取之不尽、用之不竭的；另一类是非再生能源，因为这是经过亿万年形成的、短期内无法再生的，如煤炭、石油、天然气、核燃料等。随着大规模的利用，非再生能源的储量日益减少，总有一天会枯竭。

当今人类使用最多的能源是煤炭、石油、天然气和水能，称之为常规能源；而对于太阳能、地热能、生物质能、风能、海洋能、核聚变能等，则称之为新能源。我国的原子能工业还处于初级阶段，故核裂变能也列为新能源。

三、热能的发生

热能的发生可通过两种途径：一种是直接产生，如地热能和海洋热能；另一种是通过转换产生。归纳起来，由能量形式的转换而产生热能的方法有以下几种：①化学能的转换。通过燃料中可燃质的发热化学反应即燃烧反应，使它们的化学能转换成热能释放出来。通过燃烧反应，矿物燃料里的可燃元素碳、氢和硫分别转化为二氧化碳、水蒸气和二氧化硫。②电能的转换。根据焦耳效应，因电路中电阻的存在，电流流过时必产生热。当然，在绝大多数电路里，这种热效应的产生意味着部分电能转换成不可利用的热能的损失。但实际应用中，为满足工业过程或生活的需要，有时要将电能转换成热能，如电炉炼钢。③辐射能的转换。这主要是指能使被照射的物体产生热效应的热辐射。④核能的转换。这主要是指在核裂变和核聚变反应中，大量的核能释放转换成热能。目前已可利用的是核裂变反应。⑤机械能的转换。这一典型过程就是摩擦，通常由此产生的热能都不能被利用，故一般都希望减少摩擦耗能。

四、热能的转换与储存

人类利用的各种形式的能量基本上都是由一次能源经过一次或多次转换而来的。例如，太阳照射使植物内叶绿素发生光合作用，将太阳辐射能转换储存于生物质中，而成为植物所具有的生物质能。又如，燃料在锅炉中燃烧，并把燃料的化学能转换成蒸汽的热能，再通过汽轮发电机组，完成热能转换为汽轮机的机械能，并继而通过发电机转换为电能输出。概括起来，通过一次转换，热能可成为两种能量形式：①机械能，如推动内燃机、汽轮机。②电能，如热电发电。

热能除了能与其他形式的能量进行转换外，也是可以传递的。换热器就是基本的热传递装置。在热传递装置中，不同温度水平的流体可以通过固体壁面或直接混合或借助于物体的蓄热能力进行换热，使热能从较高温度物体传给较低温度的物体。热能还具有储存的特点。热能的储存有三种基本方式：①显热贮存。这是利用升高固体或液体的温度来蓄热。②潜热贮

存。当物体发生相变时会吸收或释放大量的热，实际应用中通常是利用材料从固体到液体的相变蓄热。③半潜热储存。原理与潜热储存基本上相类似，其特点是储存时发生可逆的吸热反应，在此过程中将热能转换为化学能。

五、热能的利用

热能，不论是直接利用或转换为其他能量形式后的利用，在各生产部门和民用事业中均占有极大的比重。下面列出热能在一些主要工农业方面的应用：①电力工业，如燃烧煤、天然气、油等火力发电及使用核燃料的核发电等。②钢铁工业，如平炉、转炉、电炉炼钢，轧钢加热炉、高炉炼铁等。③有色金属工业，如铝、铜等各种有色金属的冶炼。④化学工业，如酸、碱、合成氨等生产过程。⑤石油工业，如油的开采、炼制、输送等。⑥建材工业，如水泥、陶瓷等行业中各种窑炉的大量耗热。⑦机械工业，如各种设备制造过程中所需要的铸造、锻压、焊接等。⑧轻纺工业，如造纸、制糖、化纤、印染等过程中需要消耗大量蒸汽。⑨交通运输，如汽车、火车、船舶、飞机等的动力拖动。⑩农业及水产养殖业，如电力灌溉、温室培植、鱼池加温等。⑪生活需要，如供暖、空调、烹饪等。

现代化社会是大量消耗能源的社会，有关热能利用方面需要关注两大问题。①提高能源利用率。目前世界各国基本都是以石油、煤炭、天然气等非再生的燃料能源为主要能源，这些燃料能源的储量有限，提高能源利用率或节能问题就极为重要。因为它们的利用方式主要是热能或由热能转换为机械能或电能，提高能源利用率也就意味着提高热能利用率及热能在动力等装置中转换为其他形式能量的效率问题。②减少环境污染。燃料能源的使用，将因含有害物质的废气、废料等排放而对环境造成严重污染，危害人类健康，破坏自然界的生态平衡。尤其是随着工业的不断发展，这一问题日益严重，目前在考虑全社会的持续发展中，已把它列为首要关注的问题。

第二节 能量转换与利用的基本定律

一、热力循环

要使热能连续不断地转变为机械能，工质（如水蒸气、燃气等）从初始状态起始，必须经历包含做功过程的一系列连续过程，并回到原状态。例如，蒸汽动力装置，水在锅炉中吸热变成高温高压的蒸汽，再进入汽轮机膨胀做功，排汽在冷凝器中凝结为水，经水泵加压送回锅炉，重新吸热变成蒸汽，如此周而复始、循环不已。所谓热力循环，就是工质从某一热力状态经过一连串的状态变化过程，完成了热与功转换的任务，并回复到原来起始时的热力状态。当以状态参数坐标图表示这一系列热力过程时，循环成为一封闭曲线，如图 1-1 所示压力—比体积图。

循环有正循环和逆向循环之分。如图 1-1 所示，当循环按顺时针 $1a2b1$ 的方向时，沿 $1a2$ 过程所作的功即膨胀功 w_{1a2} （相当于曲线 $1a2$ 下面积 $1a2v_2v_11$ ）要大于沿 $2b1$ 过程所消耗的功即压缩功 w_{2b1} （相当于曲线 $2b1$ 下面积 $2b1v_1v_22$ ），故该循环的总功或称为循环净功大于零，即 $(|w_{1a2}| - |w_{2b1}|) > 0$ ，意味着这是属于对外做功的一类热力系统的循环，常称热机循环或正

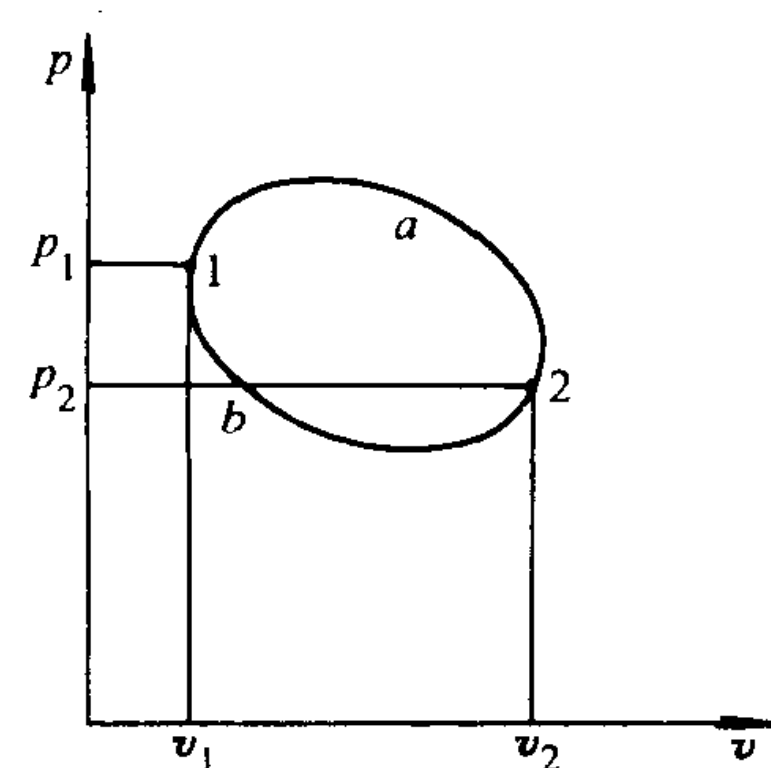


图 1-1 循环在 $p-v$ 图上表示

循环,如实现火力发电的循环。反之,当循环按逆钟向即 $1b2a1$ 进行时,膨胀功 w_{1b2} 的值小于压缩功 w_{2a1} 的值,循环净功 $(|w_{1b2}| - |w_{2a1}|) < 0$,意味着这是属于消耗外功的一类热力系统的循环,称为逆向循环,压缩式制冷机所进行的制冷循环就属于这一类。当然,工程上实际的热力循环要比图 1-1 所示情况复杂,有多种形式,但从其进行的总方向或总结果来看可分属这两种或为这两者的复合。

二、热力学第一定律

人们从长期无数的实践经验中总结得出了存在于各种自然现象中的一条最普遍、最基本的规律:能量守恒与转换定律。它表明各种能量可以相互转换,但它们的总量保持不变。热力学第一定律就是能量转换与守恒定律在伴有热效应的物理及化学等过程中的应用。它广泛地适用于热能和其他能量形式之间的转换,如热能和机械能、热能和化学能、热能和电磁能等的转换,在转换过程中其总量是守恒的。

今以一简单的具有代表性的例子说明热能向机械能的转换。图 1-2 表示一个热力系,其中包含质量为 m 的工质(如气体)的气缸。如从外界向该热力系加热 Q ,工质受热而膨胀,体积增大,推动活塞,并使活塞及与之相连的重块向右移动,对外界做功 W 。由于工质状态的改变,其本身具有的能量也可能有所改变,假设工质的能量增加了 $\Delta E = (E_2 - E_1)$ 。根据能量守恒与转换定律,工质能量的增量 ΔE 必等于工质从外界吸收的热量 Q 和工质的膨胀做功 W 之差(设活塞与缸壁间无摩擦)

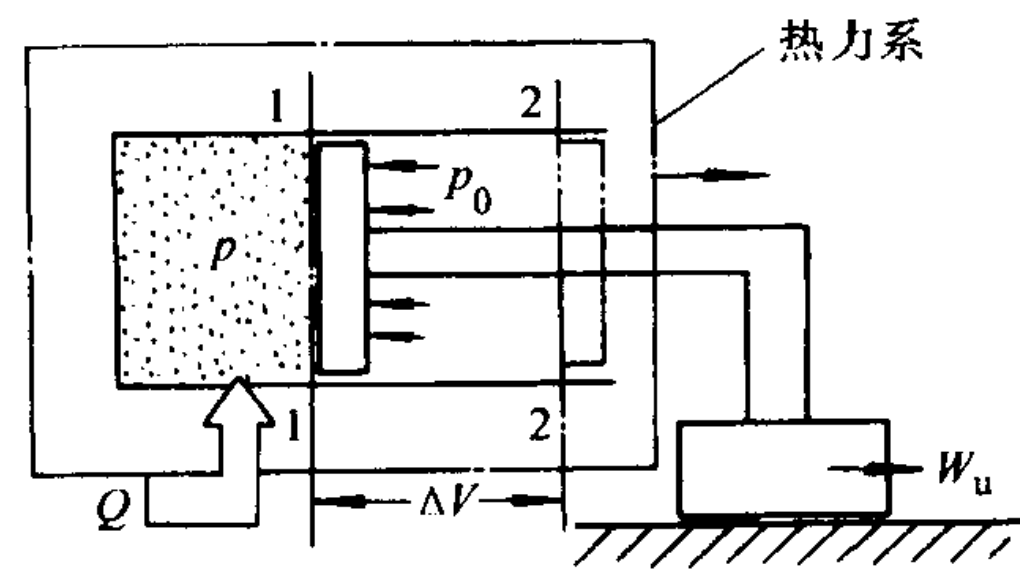


图 1-2 气体受热膨胀做功

$$\Delta E = Q - W$$

或

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

该式就是热力学第一定律的数学表达式。

对于图 1-2 所示情况,由于工质无明显的流动,工质的能量变化可以认为只是工质的热力学能(即工质的内能)变化 ΔU ,而忽略其宏观的动能和位能变化。这样,式(1-1)可以表达为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-2)$$

对于微小变化过程,则有

$$dQ = dU + dW \quad (1-3)$$

如工质为单位质量,则上式为

$$dq = du + dw \quad (1-4)$$

对于图 1-2 所示的热力系,因无工质的流入或流出,故成为闭口系。由图可见,该闭口系处于大气环境包围之中,大气环境具有恒定的压力 p_0 ,工质受热膨胀时,除了推动重物移动外还要克服大气压力 p_0 。所以,工质的膨胀功 W 大部分用于推动重物,对外界作出有用功 W_u 。少量用于克服大气压力所作功为大气压力 p_0 与体积变化 ΔV 之乘积,即 $p_0 \Delta V$,因它不用于推动重物,故称无用功。它们的关系可以表达为

$$W_u = W - p_0 \Delta V \quad (1-5)$$

当工质的膨胀为可逆过程时,则

$$W_u = m \int_1^2 p dv - p_0 \Delta V \quad (1-6)$$

工程上遇到的热力设备常常是，它不但与外界有能量的传递和转换，而且还有质量交换，即有工质的流进和流出。如在热力发电的生产过程中，作为热力循环工质的蒸汽必须流过锅炉、汽轮机、冷凝器等热力设备。今将工程应用的热力设备中能量转换情况概念性地表示于图 1-3，并讨论其能量转换与守恒问题。

除起动、停机或有负荷变化时外，实际热力设备中所进行的过程一般都处于稳定状态下进行，即对于工质而言，它在设备中各空间点的热力状态和流量都不随时间而变，这样的系统称为稳定流动系统。设工质的流量^①为 q_m ，热力系进、出口截面处流速分别为 c_1 、 c_2 ，分析图 1-3 所示有多种能量存在时的一个综合性热力系的能量平衡，应考虑工质流经热力系入口及出口截面过程中所发生的几种能量变化有：①热力学能变化， $\Delta U = (U_2 - U_1)$ ；②动能变化， $\Delta \frac{1}{2} q_m c^2 = \left(\frac{1}{2} q_m c_2^2 - \frac{1}{2} q_m c_1^2 \right)$ ；③重力位能变化， $\Delta q_m g Z = (q_m g Z_2 - q_m g Z_1)$ ；④工质流过热力系进、出口界面时，必须克服界面右边阻力而作流动功，故总的流动功为 $\Delta p V = (p_2 V_2 - p_1 V_1)$ ；⑤外界加入的热量 Q ；⑥热力系对外界作出的有用功（对流动系，常称轴功） W_u 。显然，按热力学第一定律表达式 (1-1) 中的功 W 应为

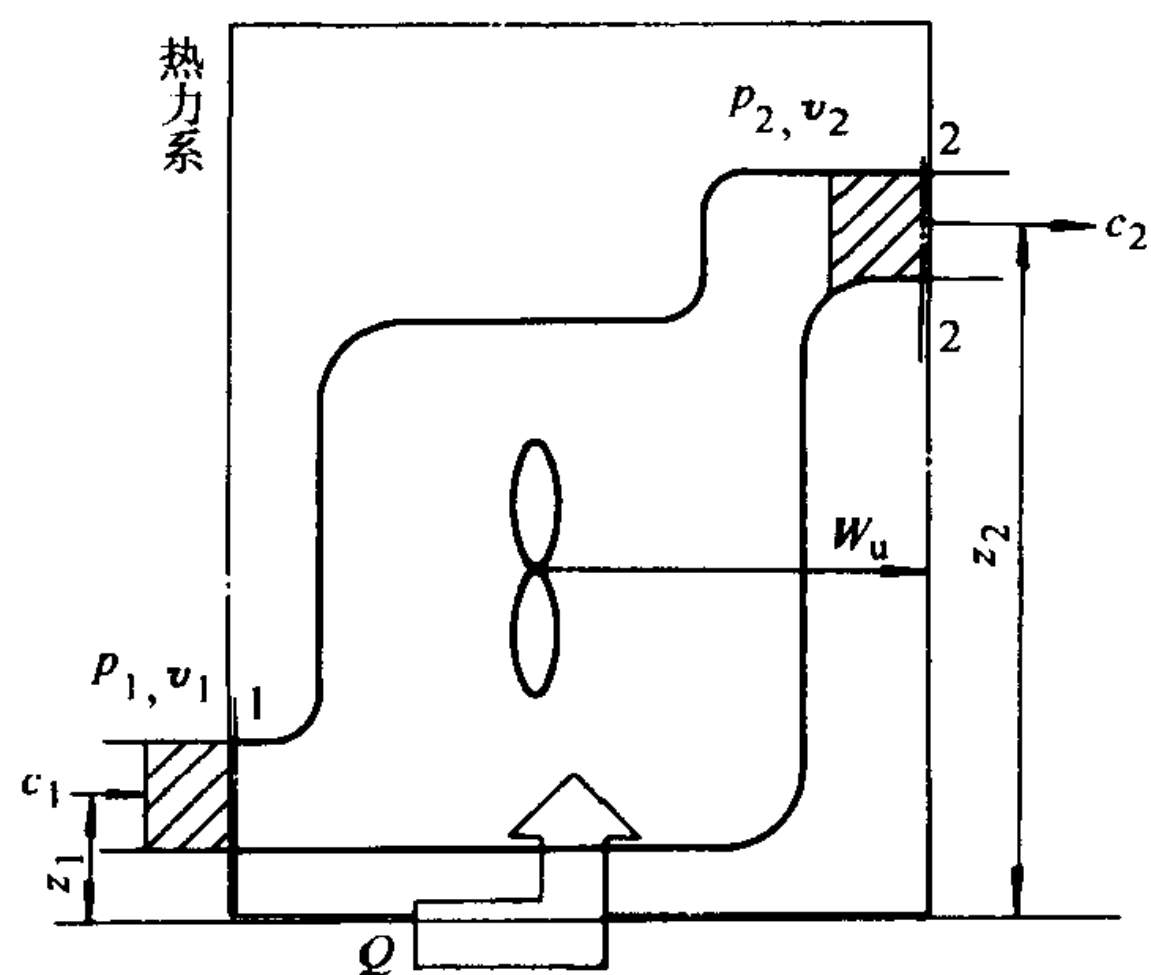


图 1-3 稳定流动热力系

显然，按热力学第一定律表达式 (1-1) 中的功 W 应为

$$W = W_u + \Delta p V$$

热力系储存能量的变化 ΔE 应为

$$\Delta E = \Delta U + \frac{1}{2} \Delta q_m c^2 + \Delta q_m g Z$$

将上述关系式代入式 (1-1)，则得

$$Q = \Delta U + \frac{q_m}{2} \Delta c^2 + q_m g \Delta Z + W_u + \Delta p V$$

按焓的定义式 $H = (U + pV)$ ，则上式可表示为

$$Q = \Delta H + \frac{q_m}{2} \Delta c^2 + q_m g \Delta Z + W_u \quad (1-7)$$

对于微小的过程

$$dQ = dH + \frac{q_m}{2} dc^2 + q_m g dZ + dW_u \quad (1-8)$$

如工质为单位质量，则上式成为

$$dq = dh + \frac{1}{2} dc^2 + g dZ + dw_u \quad (1-9)$$

式 (1-7) ~ 式 (1-9) 即为热力学第一定律应用于工质在稳定流动时的数学表达式。

① 本书将质量流量简称为流量。

三、热力学第二定律

热力学第一定律表明, 能量传递和转换时, 其数量是守恒的。但它并未表明能量转换的过程是否一定能发生, 是否需要附加的条件。

经验告诉我们, 在能量转换过程中, 许多情况下能量间的转换可以自发地进行, 如温度不同的两物体接触时, 热量总是自动地由高温物体传给低温物体; 机械能可自动地转换为热能, 如摩擦消耗的机械功自动变成热。但是, 要这些过程反向进行就不能自发地产生, 必须要有附加的条件, 或者说必须要付出一定的代价, 过程才能进行。例如, 制冷就是将热量由低温物体传给高温物体的过程, 它的完成是因为消耗了压缩功, 否则不可能。可见, 对于能量传递和转换过程的全面描述, 除了要用热力学第一定律说明过程的进行必须遵守能量守恒外, 还必须要论证过程进行的方向性, 即要应用热力学第二定律。

热力学第二定律与热力学第一定律一样, 是由长期无数的经验总结出来的, 是经过实践检验的规律。热力学第二定律的实质就是指出一切自发过程都是不可逆过程, 它们无需外加条件就能自动地进行。对于一个非自发过程, 则它的实现一定要以另一个自发过程的进行来推动。例如, 热力发动机就是实现了热能变为机械能这一非自发过程, 但为了完成这一过程并保证其延续性, 必须有一部分热量由温度较高物体传向温度较低物体这一自发过程, 如内燃机工作时, 内燃发动机要向外界排气, 将热量散给了大气。

由工程热力学可知, 关于热力学第二定律, 也可以用熵增原理来表达, 即实际过程不论其是自发的或非自发的过程, 最后的结果总是使(孤立的)热力系的熵向增加的方向进行。用数学的形式表达为

$$\Delta S_s \geq 0 \quad (1-10)$$

现以热能转变为机械能的过程为例, 说明表达热力学第二定律的熵增原理。为了研究的方便, 可将所研究的对象——热力系隔离开来, 使该热力系包含了与能量转换有关的全部物质, 而与外界无能量转换或传递关系, 即成为一个孤立的热力系。在该孤立热力系内, 工质由高温热源吸收热量 q_1 , 将其中一部分转变为单位质量的功 w , 其剩余部分即排给低温热源的热量为 q_2 , 从而完成一个如图 1-4 所示的循环 123'41。由热力学知, 实际过程都是不可逆的。为把问题简化, 仅假设膨胀过程为不可逆绝热膨胀过程 2—3, 则循环 12341 成为不可逆循环。

由于工质完成一个循环后回到原状态, 故工质的比熵变化为零, 即 $\Delta s_w = 0$ 。

高温热源在温度 T_1 时放热, 则其整个 1—2 放热过程的比熵变化量为

$$\Delta s_H = - \int_1^2 \frac{dq_1}{T_1}$$

低温热源在温度 T_2 时吸热, 则其整个 3—4 吸热过程的比熵变化量为 $\Delta s_L = \int_3^4 \frac{dq_2}{T_2}$ 。这样, 该孤立热力系总的比熵变化量为

$$\Delta s_s = \Delta s_w + \Delta s_H + \Delta s_L = 0 + \left(- \int_1^2 \frac{dq_1}{T_1} \right) + \int_3^4 \frac{dq_2}{T_2}$$

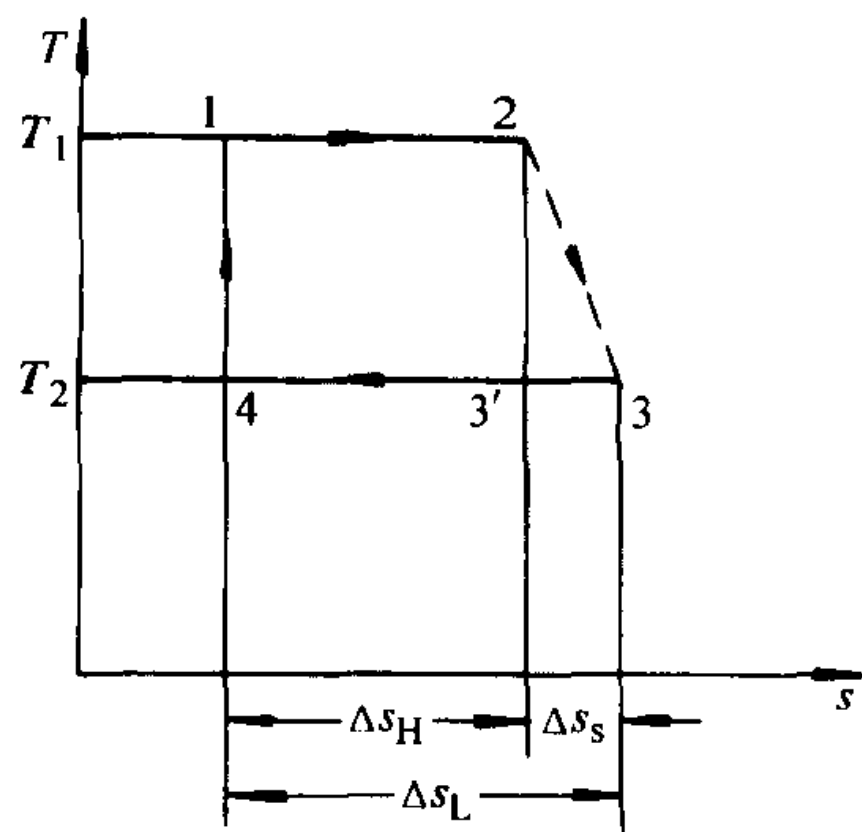


图 1-4 孤立热力系内的不可逆循环

由图可见，由于该孤立热力系内进行的是一个不可逆循环，显然存在着

$$\int_3^4 \frac{dq_2}{T_2} > \int_1^2 \frac{dq_1}{T_1}$$

所以

$$\Delta s_s > 0$$

因为实际的过程和循环都是不可逆的，所以在孤立热力系中热能转变为机械能的结果，其熵必然是增加的。一个极端的情况是假设循环为可逆，如体现在图 1-4 中过程 2—3 改为 2—3'。可见，此时 $\Delta s_H = \Delta s_L$ ，亦即孤立热力系的熵不变， $\Delta s_s = 0$ 。这也就论证了孤立热力系内进行的过程，只能使熵增加或熵不变（因实际过程都是不可逆的，故实际上不可能不变）而绝对不可能减少。

第三节 能源的有效利用与评价

能源是人类社会赖以生存与发展的重要物质基础。国民经济的增长必须有足够的能源供应量，而能源资源有限，能源利用率又不高，尤其是我国的能源利用率要比先进国家低得多；我们固然可以开发和利用新能源，但需要资金、技术和时间，所以如何合理地使用能源及提高能源利用率或者说节能问题至关重要。本节将就能源的有效利用问题及其评价指标作一阐述。

一、能源有效利用的途径

归纳起来，大体上有以下一些能源有效利用的途径：

1) 改进、研制新的能量传递和转换装置及系统，减少转换的次数和传递的距离，如改进热力发动机的结构，设置新的热力循环。

2) 从能量的数量和质量两方面分析、计算能量的需求和评价能源使用方案，按能量的品位合理使用能源，尽可能防止高品位能量的降级使用。例如，用一个较低温度的流体 D 来回收 A 、 B 、 C 三个温度不同的流体热量，其工况要求如表 1-1 所示。如果要求每一个换热器中两流体的最小传热温差为 20°C ，先考虑用一个简单的串联热交换系统进行热回收，如图 1-5a 所示，则显然对流体 B 、 C 而言，在换热器出口处的温度较高。为了达到表 1-1 中出口温度的要求，必须再加冷却器，但实际上流体 B 、 C 的热量未能得到充分回收。现如把系统改成图 1-5b 所示的组的热交换系统，则因流体 A 、 B 、 C 分别在若干级温度水平不同的系统中进行换热，故热量得到充分回收。实例计算表明，串联系统只能回收 20062kW ，而按优化的复合系统则可回收 23260kW ，即可比串联系统多回收 16% 的热量。

表 1-1 热交换系统工况

流 体 (供热/受热)	流 量 /($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	入口温度 / $^\circ\text{C}$	出口温度 / $^\circ\text{C}$	流 体 (供热/受热)	流 量 /($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	入口温度 / $^\circ\text{C}$	出口温度 / $^\circ\text{C}$
A(供热)	50	200	40	C(供热)	50	280	120
B(供热)	25	220	60	D(受热)	100	20	220

3) 以总能系统的概念，对整个企业或地区用能系统进行全面规划和优化组合，使一次能源、二次能源及余热、余压均得到充分利用，提高总能系统的能源利用率，如热电联产、热电冷联产等。

4) 大力开发节能新技术, 如高效率燃烧技术、热管技术、热泵技术等。

5) 开发和推广能源利用的运行控制新技术, 以实现能量利用的最经济运行, 如空调装置的变频运行、供热系统的用户供热独立调节等。

6) 开发、利用和提高太阳能、地热能、海洋能等新能源利用技术。

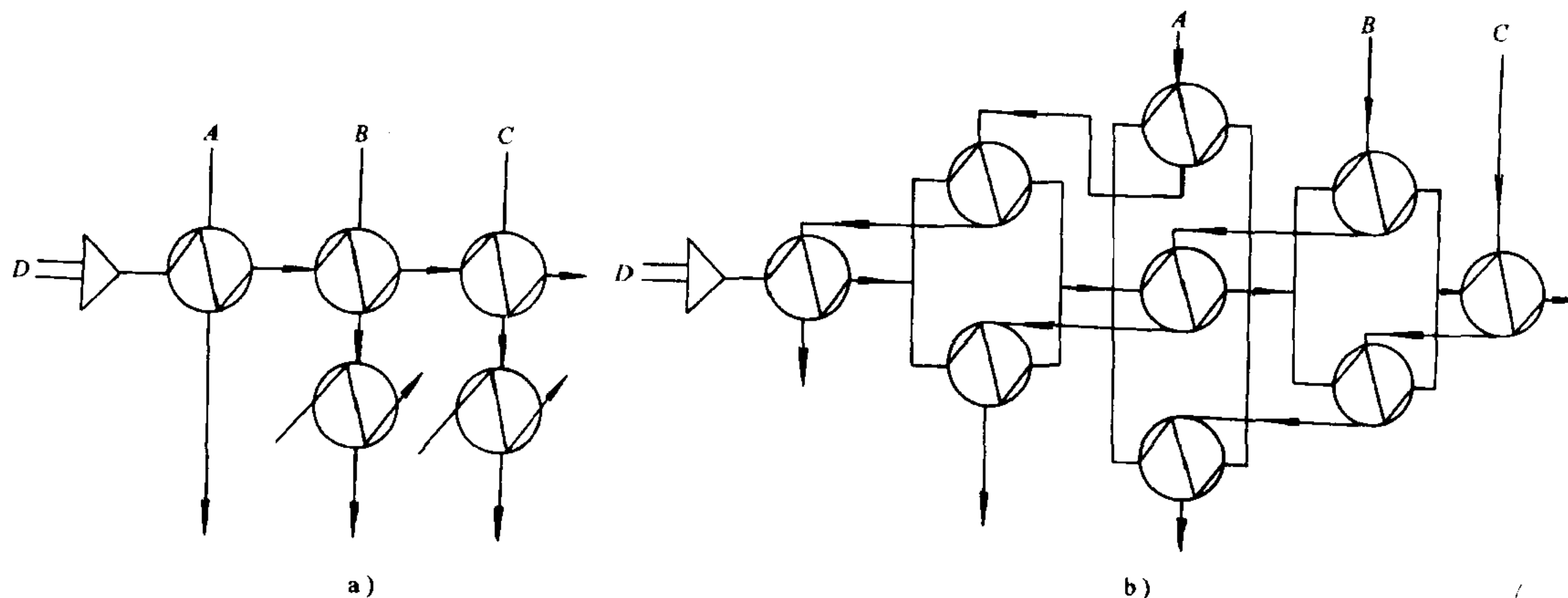


图 1-5 热交换系统

a) 串联系统 b) 优化的复合系统

二、能源有效利用的常用评价指标

关于能源有效利用的评价, 因从不同角度去评价而有不同的评价指标, 以下阐述的是三个用得较多的具有代表性的指标。

1. 能源消耗系数

能源消耗系数是指某一年或某一个时期, 实现单位国民经济产值所平均消耗的能源数量。这是一个反映能源消耗量与国民经济产值相对关系的指标, 其表达式为

$$r = E/M \quad (1-11)$$

式中, E 为能源消耗量 (kg) (指标准煤); M 为同期国民经济生产总值 (元)。

例如, 1977 年, 能源消耗系数为美国 1.33kg/美元, 英国 1.17kg/美元, 联邦德国 0.69kg/美元, 法国 0.61kg/美元, 日本 0.63kg/美元, 中国 1.03kg/美元。可以用该系数来对比、分析能源利用状况, 在排除价格因素的情况下, 可以在一定程度上说明节能潜力的大小。

2. 单位产品能耗

单位产品能耗是指每单位产品产量所消耗的能量, 它又分为单耗和综合能耗两种, 可用一个式子来表达

$$C = E_p/A \quad (1-12)$$

式中, A 为产品产量; E_p 为产品能耗。

当 E_p 是指某种能的消耗量时, C 为单耗, 如生产 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 电的煤耗。如果 E_p 是指生产某种产品过程中所消耗的各种一次能源、二次能源的总消耗量, 则 C 为综合能耗。在计算时, 各二次能源应折算到实际生产该产品时所需要的一次能源量, 常称为该二次能源的等价热量。综合能耗包含了直接能耗和间接能耗两部分。前者指生产该产品时直接消耗的能量, 后者指该产品所用的各种原材料在被生产出来时所消耗的能量, 这两者之和也称为全能耗。

3. 能源利用效率

能源利用效率也称能量利用率，它为被有效利用的能量（或获得的能量）与消耗的能量（或投入的能量）之比。它被用来考察用能的完善程度，其定义式为

$$\eta = E_e / E_c \quad (1-13)$$

式中， η 为能源利用效率； E_e 为有效利用的能量； E_c 为消耗的能量。

能源利用效率可以分别针对一台设备、一个工序、一个车间、一个部门甚至全国来计算。由于能量传递、转换与利用的设备多样性及其应用范围的不同，因而常用不同的术语来表达能源利用效率的含义。例如，对于电厂动力循环，能源利用的效率常用循环热效率来表达，它的定义为对外（即由汽轮机轴端）输出的功与（锅炉中燃料燃烧）所耗热能之比。而对于制冷装置的制冷循环，则常用制冷系数来表达，其定义为所获得的制冷量（即由低温热源所吸取的热量）与所耗的外功（如压缩机所耗电能等）之比。

三、焓及焓效率

（一）焓

在上述三个指标中所用到的能量只是能量的数量，而未涉及到能量的质量。对于能量可以被利用的程度而言，不仅应考虑能量的数量多少，而且应考虑能量的质量如何（即能量的品位高低）。例如，将热能和机械能相比，由热力学第二定律知，热能不能全部转变为机械能，其中必须有部分热能传给另一较低温度的物体，而机械能却能全部转换为热能。可见，机械能比热能的质量高。这说明，不同形态的能量，“质量”不同。此外，对于同一能量形式，因处在不同的状态，能的“质量”也不同。例如，相同数量的热能，温度不同，可以转变为功的多少也不同。相对于同一环境温度，温度高的热能转变为机械能的数量要大于温度低的热能。所以，温度高的热能的质量要比温度低的热能高。显然，与环境温度相同的热能，因不可能再有作功能力，其“质量”最低。经验表明，机械能是一切形态能量中“质量”最高的一种，而且是应用极为广泛的能量，所以通常以机械能为标准，用转变为机械能的程度来衡量其他形态能量“质量”的高低。为了在评判能量的合理利用时能同时考虑到能量的数量和质量，近几十年来学术界引入了一个与作功能力密切相关的参数“焓”，并逐渐付之于实际应用。

所谓焓，是指处于某一状态的热力系，可逆地变化到与周围环境状态相平衡时，可以转化为有用功（即最大有用功）的能量。此值即为该热力系的焓，或可更直观地称为有效能，以符号 Ex 表示，单位为 J。对单位质量工质而言，它的焓称为比焓，以 ex 表示，单位为 J/kg。

设今有图 1-3 所示的一个稳定流动热力系， $W_{\max}$ 为该热力系由某一起始状态可逆地变化到环境状态 0 时对外作出的最大功，则利用热力学第一、二定律可得最大功，亦即焓为

$$Ex = W_{\max} = (H - T_0 S) - (H_0 - T_0 S_0) \quad (1-14)$$

式中， H 、 S 分别为热力系在某起始状态时的焓和熵； H_0 、 S_0 分别为热力系在环境状态 T_0 时的焓和熵。

则比焓为

$$ex = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (1-15)$$

由热力学第二定律知，任何热源当其温度为 T 时所传出的热量 Q 中能转换为功的最大值，应是在温度范围 T 及 T_0 内卡诺循环的作功量，即

$$W_{\max} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

根据前述关于焓的概念，热量中这部分能转换为功的最大可用部分也可称之为焓。由于这是单指热量而言，为区别于式 (1-14) 所定义的焓，则可称其为热焓，以 Ex_Q 表示，即

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1-16)$$

对比式 (1-14) 与式 (1-16) 可见，热焓是由热量 Q 热源放热时的温度所决定的；而工质焓只决定于热力状态，故可认为是一个状态参数，但两者都表示能的可用性。

燃料燃烧是在热能利用与动力机械装置中常遇到的过程。由于燃料燃烧过程中放出的热能，以及因燃烧引起反应物体体积的变化都可以通过一定的方式转换成机械能，所以根据焓的普遍定义中关于“最大有用功”的概念，对于燃料的焓也可做出定义。燃料焓可以表达为：燃料与氧气可逆地进行燃烧反应和变化后，与周围环境达到平衡时，所能提供的最大有用功。所以，也可称为燃料的化学焓或燃料的化学有效能。计算燃料的化学焓时通常取环境压力 $p_0 = 101\text{kPa}$ 、环境温度 $T_0 = 298.15\text{K}$ （即 25°C ）的饱和湿空气为环境空气，整个计算过程比较复杂。理论证明，燃料的化学焓可近似地取为燃料的高发热值，即

$$E_f \approx Q_H \quad (1-17)$$

(二) 焓效率

由于实际过程都是不可逆的，则必存在着有效能的损失，这一损失也可从焓的概念来表达。

今仍利用图 1-3 所示的稳定流动热力系，假设工质由状态 1 不可逆地变到状态 2，在此状态变化过程中它只与环境之间传递热量，无其他热源，并忽略工质的动能与位能，则

$$H_1 + Q = H_2 + W_{12} \quad (1-18)$$

由热力学第二定律知，对于可逆过程，工质的熵变化是由于与环境换热所引起，而今为不可逆过程，则必存在

$$(S_2 - S_1) > \int_1^2 \frac{dQ}{T_0}$$

或可写成

$$(S_2 - S_1) - \int_1^2 \frac{dQ}{T_0} = \Delta S_s$$

将此式代入式 (1-18)，则不可逆过程中的功为

$$W_{12} = (H_1 - H_2) - T_0(S_1 - S_2) - T_0\Delta S_s$$

再将式 (1-14) 代入上式，则

$$W_{12} = Ex_1 - Ex_2 - T_0\Delta S_s \quad (1-19)$$

如工质状态变化为可逆的，则因 $\Delta S_s = 0$ ，可得最大功为

$$W_{12,\max} = Ex_1 - Ex_2 \quad (1-20)$$

可见，由于过程的不可逆性，功的损失为

$$\Delta W_L = T_0\Delta S_s \quad (1-21)$$

式 (1-21) 表明，功的损失与熵的增量成正比，比例常数就是环境温度 T_0 。由式 (1-20) 可见，如果过程可逆，可以利用的能量为工质进出热力系的焓值之差。由于过程不可逆，使可以利用的焓值减少，其量相当于 $T_0\Delta S_s$ ，这就是焓损失 Ex_L ，即对于本例存在