

# 电站热力系统节能 原理与方法

闫水保 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电站热力系统节能 原理与方法

闫水保 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书阐述了电站热力系统的节能原理与方法及其在发电厂中的应用,介绍了循环函数法、等效焓降法和矩阵法的最新研究进展,重点讲述了工质实际做功能力原理和特征函数法及其应用、特征函数法与现有方法的关系、热力系统变工况模型及热力系统热经济性诊断方法等。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业高年级本科生及研究生的参考教材,也可供相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电站热力系统节能原理与方法/闫水保著. —北京:  
中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-5936-6

I. 电... II. 闫... III. 火电厂-热力系统-节能-  
高等学校-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112380 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 8 印张 175 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.80 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

# 前言

随着能源供应日趋紧张、环境日趋恶化，人类追求可持续发展的愿望空前强烈，解决好能源与环境问题已成为人类社会的基本问题之一。在“十一五”规划中，首次把节能降耗目标作为主要的阶段性任务，更加突出了节能降耗工作的重要性。解决好能源问题，需要从开发和节能两个方面着手，并且应以节能为优先方向，这是因为：地球既不是一个无限大的物质库，也不是一个无限大的热库，能源的开发和使用必须以环境的承载能力为限度。自然界恢复其健康状态的能力是有限的，所以人类要提高自己的生活水平，一方面需要将传统的生产过程向环保领域扩展，提高环境的恢复能力；另一方面需要将能源的开发和使用限制在环境能力承载的限度内，这才是和谐发展。在环境的承载限度内，人类发展生产、提高生活水平的根本途径就是要节约能源，提高能源的使用效率，用有限的能源来生产更多、更好的商品。

电站热力系统是人类生产有序能（电能）的主要系统，同时也承担着不同品质热能换热器的功能（热电联产或热电冷三联产），所以提高电站热力系统的经济性对于国民经济的可持续发展具有全局性意义。由于电站热力系统结构复杂，且常处于变工况运行状态，要全面地提高其能源利用率，必须有一套有效的理论作为指导，鉴于此，作者撰写了本书。

目前有多种电站热力系统节能理论，较有影响的理论有：循环函数法、等效焓降法和矩阵法等，对这些理论的改进和深化研究已有大量文献报道。不过，本书不是重复现有理论，也不是对现有理论进行改良，而是从研究热力学基本定律的应用着手，重点阐明热力学定律在电站热力系统应用的合理形式及其普遍性，提出工质实际做功能力原理，导出热力系统节能分析理论，并对现有方法的优缺点进行讨论。

“特征函数法”是本书所提出的关于热力系统节能理论的一种新方法，它不是对某一现有方法进行改良的直接结果，不是追求某一现有方法的完善性，而是对现有方法进行融合的结果，是对现有方法共性问题进一步提炼的结果。特征函数法不否定现有方法的作用和意义，而是指出了更好地利用现有方法的途径。无论读者原来对哪一种方法比较熟悉，都能很快地掌握本书中的方法。

本书是作者十余年来对电站热力系统节能分析理论研究的总结，希望本书的出版能够加强与社会各界同仁的交流与合作，共同推动电站能源利用效率的提高，为我国的节能降耗事业做出贡献。

由于时间仓促和水平所限，书中难免出现疏漏与不妥之处，敬请读者批评指正。

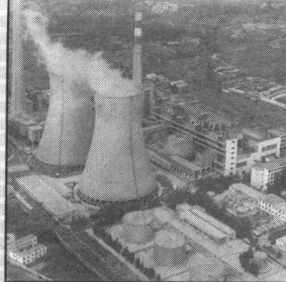
闰水保

2007年5月10日

## 前言

<b>第一章 热力系统节能分析的基本概念</b> .....	1
第一节 热能及其利用 .....	1
第二节 热力系统 .....	2
第三节 状态与状态参数 .....	3
第四节 平衡状态 .....	3
第五节 热力过程 .....	3
第六节 过程量——功与热 .....	4
第七节 热力循环 .....	6
<b>第二章 热力学基本定律与电站热经济指标</b> .....	8
第一节 热力学第一定律 .....	8
第二节 热力学第二定律 .....	9
第三节 卡诺热机的效率 .....	10
第四节 焓 .....	11
第五节 热力循环的状态参数 .....	12
第六节 焓的应用 .....	13
第七节 电厂主要热经济指标 .....	14
<b>第三章 工质实际做功能力原理</b> .....	19
第一节 多热源热机系统 .....	19
第二节 蒸汽动力循环 .....	20
第三节 回热循环 .....	22
第四节 再热机组的回热循环 .....	24
<b>第四章 传统节能理论的发展</b> .....	29
第一节 概述 .....	29
第二节 热平衡法 .....	30
第三节 循环函数法 .....	30
第四节 等效焓降法 .....	33
第五节 矩阵法 .....	39
<b>第五章 特征函数法</b> .....	43
第一节 工质实际做功能力原理的应用 .....	43
第二节 回热系统的流量分布算法 .....	46

第三节	热力系统热经济性指标的计算 .....	47
第四节	用流量分布算法计算非再热机组的热经济性 .....	48
第五节	用流量分布算法计算再热机组的热经济性 .....	52
<b>第六章</b>	<b>做功效率分析法 .....</b>	<b>56</b>
第一节	做功效率递推算法 .....	56
第二节	用矩阵运算求做功效率的方法 .....	57
第三节	热力系统热经济性指标的计算 .....	58
第四节	再热器流量公式验证 .....	60
<b>第七章</b>	<b>改进的循环函数法 .....</b>	<b>63</b>
第一节	概述 .....	63
第二节	回热系统简化原理 .....	63
第三节	加热单元的通用函数 .....	65
第四节	加热单元进水系数的矩阵算法 .....	68
<b>第八章</b>	<b>特征函数法与传统方法的关系 .....</b>	<b>72</b>
第一节	热力系统广义数学模型 .....	72
第二节	热力系统的类层次 .....	75
第三节	热力系统节能分析方法的一致性 .....	76
<b>第九章</b>	<b>热力过程变工况模型 .....</b>	<b>81</b>
第一节	概述 .....	81
第二节	汽轮机性能指标及变工况 .....	81
第三节	回热加热器性能指标及变工况 .....	84
第四节	凝汽器性能指标及变工况 .....	87
第五节	锅炉效率计算串联模型 .....	90
<b>第十章</b>	<b>热力系统热经济性诊断 .....</b>	<b>93</b>
第一节	热力系统动态优化模型 .....	93
第二节	能级效率显式矩阵算法 .....	96
第三节	汽轮机排汽焓在线算法 .....	101
第四节	锅炉受热面能级分析 .....	104
<b>第十一章</b>	<b>特征函数法应用举例 .....</b>	<b>109</b>
第一节	某 300MW 机组的热力系统分析 .....	109
第二节	某 660MW 机组的热力系统分析 .....	114
<b>参考文献</b>	.....	<b>119</b>



## 第一节 热能及其利用

能源是人类社会赖以存在的基本物质条件之一，人类社会的发展、进步与利用能源的方式和水平密不可分。

所谓能源，是指一些具体的能量存在形式。人类可以利用这些能源来为人类自身服务，例如，利用煤、油、天然气、生物质等化学能及风能、水力能、太阳能、地热能、潮汐能、原子能等。物质是能量的载体，能量是物质运动的度量。能量形式与物质结构密切相关，例如，机械能是物体整体运动及相对位置相关的能量形式；热能是与分子、原子无规则热运动及分子间作用力有关的能量形式；化学能是与分子化学结构相关的能量形式；核能是与原子核结构相关的能量形式。

人类活动是一种有序的物质运动形式。人类活动，特别是生产活动需要大量的有序能量支持。目前，人们常用的有序能形式主要有机械能以及与机械相当的电能等，自然界中存在的能够被人类直接利用的有序能数量非常有限，是一种稀缺资源，不能满足人类物质文化生活的需要。所谓能源开发是指如何获得有序能的过程，所谓节能也是指有序能的节能。特别是随着人类活动范围的扩大、物质生活水平的提高，人类对有序能的需求迅速增加。能源供应不足直接导致了能源短缺，开发和节约能源已成为人类必须面对的重大挑战。

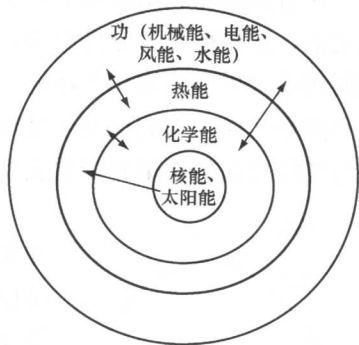


图 1-1 能量的各种形式及相互转化

在人们利用能源的过程中，热能是一种特别重要的能量形式。在世界上经过热能形式被利用的能量平均超过 85%，我国则占 90% 以上，因此热能的开发和有效利用对人类社会的发展意义重大。热能与其他能量形式的相互关系可用图 1-1 表示，其中，热与功的转化最为重要。人类对热能的利用主要有两种基本形式：一种是直接利用，例如在供热、冶金、化工、食品、纺织等工业领域；另一种是热能转化为机械能或电能等有序能量形式，再被动力机械设备利用，例如，运输、航空航天、机械、电工电子、制冷等工业领域。在许多场合下，人们通常既需要机械能或电能，又需要热能或冷能，需要进行合理的品质匹配才能更有效地使用热能。在自然界中，人们所需要的热能主要是由化学能（如煤、石油和天然气等）和核能（太阳能、地热能、核裂变或核聚变反应等）转化而来的。

人类对热能利用规律的知识是在长期的生产活动和生活实践中逐渐总结出来的。18 世纪中叶以后，蒸汽机的发明和应用，带来了人类生产方式和生活方式的变革，推动了热学方面的理论研究。1824 年，法国人卡诺（Saudy Carrot, 1796—1832）提出了卡诺定理

和卡诺循环,指出了热机必须工作在不同温度的热源之间,且至少有一个热源是接收热能的,并提出了热机效率的上限概念,奠定了热力学第二定律的基础。1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能相互转化。1850年,焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在他的论文中以精确的实验结果提出了能量守恒与转化定律。1850—1851年间,克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和开尔文(Lord Kelvin, 1824—1907)先后独立地从热量传递的方向性和热功转化的方面提出了热力学第二定律。热力学第一定律宣告第一类永动机(即不消耗能量就能提出功的永动机)是不能实现的。热力学第二定律则指出第二类永动机(只从单一热源吸热的永动机)是造不出来的。这两个定律奠定了热力学理论的基础。

热力学第一定律和第二定律从本质上指出了热能尽管在数量上与机械能相当,但在品质上与机械能存在差别,不能简单地将热能等同于机械能。热力学定律表明:热能是比功更为复杂的能量形式,要描述一种热能状态,除了热能的数量方面的参数外,还需要一个品质方面的参数(比如温度)才能确定。

## 第二节 热力系统

在研究热能利用过程中,为了明确研究对象的范围,通常将研究对象从周围物体中分离出来,这种被人为分离出来,作为研究对象的物体总体称为热力系统,除去研究对象以外的物质世界部分均称为环境,或外界,如图1-2所示。热力系统通过边界与环境进行物质和能量交换,人们也是通过热力系统的边界来感知和研究热力系统的变化。根据热力系统与外界之间的能量和物质交换情况,热力系统可分为不同的类型。

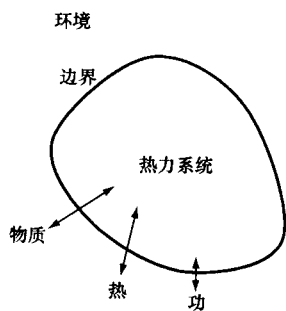


图 1-2 热力系统与环境

开口系:如果热力系统与外界既有纯能量交换,又有物质交换,则称该系统为开口系统。开口系统中的能量和物质都是可以变化的,但通常是在一个固定的空间内进行,所以开口系统又称为控制容积系统。

闭口系:如果一个系统与外界只有纯能量交换而无物质交换,则该系统称为闭口系统。闭口系统内质量保持不变,所以也称为控制质量系统。

孤立系:如果热力系统与外界既无纯能量交换,又无物质交换,则称该系统为孤立系统。通常,孤立系统是指由一个或多个热力系统的与之作用部分环境组成,质量和纯能量只在这几个热力系统之间或与之作用的部分环境之间进行。

在动力工程中,最常见的热力系是由可压缩流体(如水蒸气、空气和燃气等)构成的。这类热力系统与外界可逆的功交换只有体积变化功,称为简单可压缩系。

热库:热容量为无限大的热力系。它与环境发生热交换时,强度参数温度不变,如大气和海洋。

功库:大容量贮能系统,只准功通过,不准热和物质通过。功量进出系统时其强度参



数不变,是可逆系统。

物质库:质量远远大于开口系工质质量的系统,它在供给、接受开口系的质量时,热力学强度参数保持不变。

热力系统的划分要根据具体问题而定;对于同一个问题,也可以有不同的划分方法。热力系统的划分以能解决问题为原则,一个好的划分方法往往能更有效地解决问题。

### 第三节 状态与状态参数

在热力系中,作为能量传递或转化载体的物质被称为工质。热力系统所呈现的宏观物理状况是通过工质的宏观物理状况来体现的,所以把工质在某一瞬间所呈现的宏观状况称为热力系统的状态,简称状态。用于描述工质所处状态宏观物理量称为状态参数,例如,压力、温度、比体积等。这些物理量反映了大量分子运动的宏观平均效果。如果状态参数的全部或部分发生了变化,则认为热力系的状态发生了变化;反之,如果状态参数没有发生变化,则认为热力系的状态没有发生变化。热力系的状态完全由其状态参数决定。一旦热力系的全部状态参数确定了,工质的状态也就确定了。因此,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,与如何达到给定状态无关。状态参数的这一特性表明其在数学上是点函数,其微元符合全微分条件。即,如果变量  $z$  是热力系统的状态参数,则必有

$$\oint dz = 0$$

状态参数可分为两类:一类称为强度量,强度量对物质的偏微分恒为零,如温度、压力的值与物质的量无关;另一类参数称为广延量,它们的值正比于物质的量,如物质的体积、热力学能、焓等。广延量对物质的量的偏微分是强度量,如比体积、比热力学能、比焓、比熵等。

### 第四节 平衡状态

在热力学中,导致热力系状态变化的原因被称为热力学势,热力学势也是状态参数。如果热力系与环境之间、热力系内部各部分之间的热力学势差都不存在,则热力系统的状态参数能够长期保持不变,这时,则称热力系处于平衡状态。若热力系内工质的强度参数不随空间位置变化,则称热力系为均匀系统。对于处于平衡状态的均匀系统,可对热力系统采用“集总参数法”进行描述,即采用空间上的“零维模型”。

通常引起热力系统变化的势有温度、压力和化学势。其中温度差是热能交换的原因;压力差是机械功交换的原因;化学势是物质在不同相之间交换的原因。此外还可能存在着其他势,如重力势、电场力势、磁场力势、引力场势等。

### 第五节 热力过程

热力系在势差的作用下,其状态参数会发生一系列的变化,这些变化的总体称为热力

过程。如果用有限的势差作用于热力系，热力系各部分的强度参数必然会不同，随空间变化，这时描述热力系的状态必须用空间上的分布参数，会使研究热力系能量转化过程变得非常复杂。因此，人们引入了“准平衡过程”概念。

若热力过程进行得足够缓慢，每次作用到热力系上的势差足够地小，使工质有足够的时间恢复到平衡状态，这时热力系内部各点的强度参数随时足够地均匀，因此仍可用“集总参数法”来简化对热力系的描述。这样的热力过程被称为准平衡过程。实现准平衡过程的条件是，外部势差足够小，内部各部分之间势差不均匀所产生的热力系内宏观过程进行得足够快。工程上应用的许多热力过程接近准平衡过程。例如，气体在内燃机活塞中的热力过程，活塞运动的速度通常不足  $10\text{m/s}$ ，而气体分子运动的速度、气体内压力波的传播速度都在每秒数百米，即使气体内部压力（势差）存在一些不均匀性，也会很快得以消除，所以对于内燃机中进行的热力过程，可以认为是准平衡过程。

自然界中存在的热力过程总是能产生一些可察觉的变化，其中总有一些变化是永远无法回复的，这种现象被称为耗散效应。例如在气缸运动的活塞，由于摩擦的存在，气体膨胀做功量不足以使活塞回复到膨胀做功前的位置。如果人用力将活塞强行推到膨胀做功前的位置，活塞内气体的状态确实回到了原来的状态，但人必要消耗一定的功，而人产生这部分功却需要消耗一定的食物，这部分被消耗掉的食物是无法自动恢复的。

耗散效应存在于任何自发进行的热力过程中，是一种普遍存在的自然现象。对于工程热力学而言，其研究的主要内容是热与功转化的外部条件，而非热力系内部存在的耗散效应。所以，工程热力学对实际热力过程进行了简化，提出了“可逆过程”概念。所谓“可逆过程”，是指忽略了一切耗散效应的热力过程，而存在耗散效应的热力过程称为“不可逆过程”。由于忽略了耗散效应，所以当可逆过程按相同的路径恢复到其初始状态时，与热力系发生作用的环境也回到了原来的状态而不会留下任何变化。为了能使热力学的结论能应用于实际不可逆过程，在热力学中定义了一些系数来考虑热力系的耗散效应（不可逆性），而这些系数的确定通常由其他的学科给出（如流体力学、传热传质学等）。

由于热力系统在有限势差的作用下总会产生耗散效应，所以可逆过程只能在准平衡过程范围中去找，也就是说可逆过程必为准平衡过程。在准平衡过程中，若忽略了其中的耗散效应，就是可逆过程。显然，可逆过程的每一个状态都可用状态参数来描述。

研究可逆过程具有重要的理论和实用价值。这是因为：我们所讲的节能降耗、提高用能效率，其本质上就是减少热力过程的不可逆性，而减少不可逆性的理论极限就是去除系统中的全部不可逆性，这样的热力过程就是可逆过程。研究热力过程就是要在一定的技术经济比较准则的指导下，尽量减少热力过程的不可逆因素，使其尽可能地接近可逆过程，这就为开展节能工作提供了基本的方法论。另外，可逆过程概念还与可持续发展和循环经济等概念有关。

## 第六节 过程量——功与热

### 一、功的定义

在热力学中，功是热力系与环境之间进行的一种纯能量交换方式，且是有序能的交换

方式。热力系与环境之间可以有多种形式的功交换，其中每一种功均可定义为广义力与广义位移的积，即

$$\delta W = F dx \quad (1-1)$$

我国在工程热力学中约定：热力系对外做功时，功量取正值；热力系接收外界功时，功量取负值。由于功量与热力系所经历过程有关，所以功量是过程量，不是全微分，故其微量用前缀“ $\delta$ ”表示，以区别全微分符号“ $d$ ”。用大写  $W$  和小写  $w$  分别表示质量为  $m$  的工质和  $1\text{kg}$  工质与外界所交换的功量。在我国的法定单位制中，功量的单位是焦耳，用符号  $J$  表示。热力系常见的可逆功的形式有体积变化功、固体中的弹性力做功、液体表面张力做功、电场极化功、磁场磁化功等。由于气体或蒸汽具有很强的做体积变化功的能力，在动力工程领域中应用广泛。

气体或蒸汽通过体积膨胀对外做功，其功量可表示为

$$W_{12} = \int_1^2 p dV \quad (1-2)$$

式中： $p$  为热力系的压力， $\text{Pa}$ ； $V$  为热力系的体积， $\text{m}^3$ 。

膨胀功可用  $p-V$  图上过程线下方的面积表示，如图 1-3 (a) 中阴影部分的面积所示。由于在  $p-V$  图上表示功量比较方便，故  $p-V$  图又称为示功图。

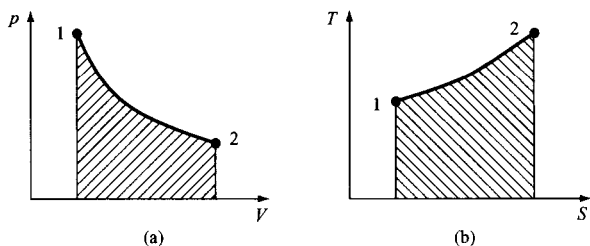


图 1-3 膨胀功和热量的表示

(a) 膨胀功；(b) 热量

## 二、热量的定义

热量是热力系统与环境之间由于温度不同所进行的另一种纯能量交换方式，是无序能的交换方式。在我国的工程热力学中规定：热力系吸热，热量取正值；热力系放热，热量取负值。用大写  $Q$  和小写  $q$  分别表示质量为  $m$  的工质和  $1\text{kg}$  工质与外界所交换的热量。在我国的法定单位制中，热量的单位是焦耳，用符号  $J$  表示。

热力系与外界的热量交换计算式为

$$Q_{12} = \int_1^2 T dS \quad (1-3)$$

式中： $T$  为热力系的热力学绝对温度， $\text{K}$ ； $S$  为系统的熵， $\text{J/K}$ 。

可逆过程的吸热量可用  $T-S$  图上过程线下方的面积表示，如图 1-2 (b) 中阴影部分的面积所示。由于在  $T-S$  图上表示热量比较方便，故  $T-S$  图又称为示热图。

## 三、状态公理

热力系独立状态参数的数目为  $N$ ，等于系统与外界进行功量交换的广义功的数目  $n$  加 1，其中“1”代表热力系与外界进行热交换作用。若系统与外界只有一种功量交换，则称热力系统为简单系统。若简单系统与外界交换的功是体积变化功，则称为简单可压缩系统，其独立状态参数数目为 2。如气体和蒸汽做功系统就是简单可压缩系统，其独立状态参数数目为 2。

## 第七节 热力循环

循环是封闭的过程。如果热力过程经过一系列中间状态之后，又回到了原来的状态，则这种过程就是循环。若循环对外做功，则称为正向循环，如内燃机循环、蒸汽动力循环等。若循环接收外界的功，则称为逆向循环，如制冷循环、热泵循环等。若组成循环的封闭过程是可逆过程，则称为可逆循环。

用来度量热力循环经济指标的原则性定义为

$$\text{经济性指标 } c = \frac{\text{得到的收益}}{\text{花费的成本}} = \omega \cdot COP$$

在上式中，所得到的收益可用所生产能源的价格与能源数量之积表示；所花费的成本可用所耗能源的价格与其数量之积表示。 $\omega$  为所生产能源价格与所耗能源价格之比，是能源生产过程的价格增值因子； $COP$  为所生产能源数量与所耗能源数量之比，表示能源在转化过程中的数量关系，如下面所讲的热效率、热泵系数、制冷系数等。

热力循环可分为正向循环和逆向循环，如图 1-4 和图 1-5 所示。正向循环是实现热向功转化的循环，称为热机循环，如发电厂热力循环；逆向循环是功量的储存循环（或称蓄能循环），如制冷循环和热泵循环。

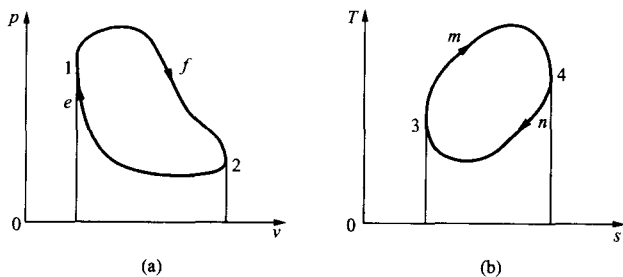


图 1-4 正向循环  
(a)  $p-v$  图；(b)  $T-s$  图

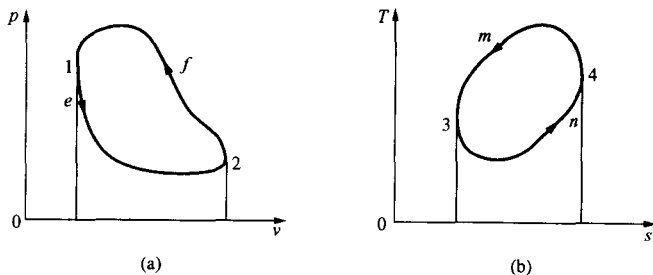


图 1-5 逆向循环  
(a)  $p-v$  图；(b)  $T-s$  图

### 一、热机循环的经济性指标

对于热机循环的经济性，通常用热效率  $\eta_t$  或热耗率  $H_R$  来衡量。其中热效率  $\eta_t$  可表示为

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} \quad (1-4)$$

$$w_{\text{net}} = \oint \delta w \quad (1-5)$$

式中： $w_{\text{net}}$  为循环的净功量，J； $q_1$  为从高温热源的吸热量，J。

热效率的倒数就是热耗率，但在电站热力循环分析中，通常以  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  功量为基准计算热耗率，这样，热机的热耗率可表示为

$$H_R = \frac{3600}{\eta_t} \quad (1-6)$$

### 二、蓄能循环的经济性指标

对于制冷循环，其经济性指标可用制冷系数  $\epsilon$  表示，即

$$\epsilon = \frac{q_2}{w_{\text{net}}} \quad (1-7)$$

$$w_{\text{net}} = -\oint \delta w \quad (1-8)$$

式中： $q_2$  为逆向循环从低温热源吸收的热量，J； $w_{\text{net}}$  为逆向循环吸收的外界功量，J。

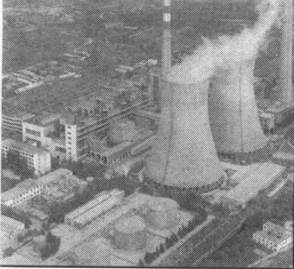
对于热泵循环，其经济性指标可用供热系数  $\epsilon'$  表示，即

$$\epsilon' = \frac{q_1}{w_{\text{net}}} \quad (1-9)$$

$$w_{\text{net}} = -\oint \delta w \quad (1-10)$$

式中： $q_1$  为逆向循环向高温热源放出的热量，J； $w_{\text{net}}$  为逆向循环吸收的外界功量，J。

从上面的热力循环经济性指标的定义可以看出：无论是热机，还是制冷机或热泵，性能指标中都出现了功量项。若热机性能用热耗率来评价，则无论是正向循环，还是逆向循环，性能指标都是以功量为基准进行评价的，所以用功量为基准对热力循环性能评价是较通用的方法。



## 第二章

# 热力学基本定律与电站热经济指标

### 第一节 热力学第一定律

能量守恒与转化定律是自然界的基本规律之一。其基本内容是：“自然界中的一切物质都具有能量，能量不可能被创造，也不可能被消灭；但能量可以从一种形态转变为另一种形态，且在能量的转化过程中，能量的总量保持不变。”热力学第一定律是能量守恒和转化定律在热现象中的具体应用，它指出了热能与其他能量形态在转化过程中数量上的守恒关系。

对于热机循环，热力学第一定律可以表述为：“在热机循环中，循环对外界做的总功量等于循环从外界的总吸热量”。即

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (2-1)$$

若令

$$dU = \delta Q - \delta W \quad (2-2)$$

则式(2-1)可写成

$$\oint dU = \oint (\delta Q - \delta W) \equiv 0 \quad (2-3)$$

所以变量  $U$  在数学上满足全微分条件，是热力系的状态参数。在热力学上，称  $U$  为热力系的热力学能，其单位为 J。用大写  $U$  和小写  $u$  分别表示质量为  $m$  的工质和 1kg 工质的热力学能。

对于闭口系，热力系只能通过热量和功量与外界交换能量。对于简单系统，热力系与外界进行功量变换的方式只有一种，其独立状态变量的个数为 2。既然热力学能是热力系的状态参数，所以热力学能可以表示为一个二元可微函数，即  $U(X, Y)$ ，根据二元函数的微分关系可写出  $U(X, Y)$  的微分表达式为

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)_Y dX + \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_X dY \quad (2-4)$$

不失一般性，指定  $X$  为与热能交换相对应的热力系参数， $Y$  为与功量变换相对应的热力学参数， $X$ 、 $Y$  为广延量，则偏微分  $\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)_Y$ 、 $\left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_X$  也是热力学参数，且是强度量。

对比式(2-2)和式(2-4)可得

$$\delta Q = \left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)_Y dX \quad (2-5)$$

$$\delta W = \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_X (-dY) \quad (2-6)$$

在式(2-5)中,定义偏微分 $\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)_Y$ 为进行热交换的推动势,称为热力学绝对温度,记作 $T$ ;定义 $X$ 为系统在与外界进行热交换时热力系变化的度量,称为熵,记作 $S$ 。实际上,人们已经用其他方式定义了这两个状态参数。

在式(2-6)中,定义偏微分 $\left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_X$ 为进行功交换的广义力,记作 $F$ ;定义 $Y$ 为系统在与外界进行功交换时热力系广义位移,广义位移的方向定义为使热力学能增加的方向,我国的工程热力学中约定广义位移的方向是热力学能减少的方向,即 $(-dY)$ 方向。

根据我国在工程热力学中的约定,式(2-4)可写为

$$dU = TdS - F(-dY) \quad (2-7)$$

对于简单可压缩系可逆过程, $F = p$ , $-dY = dV$ ,所以有

$$dU = TdS - pdV \quad (2-8)$$

式(2-8)就是对于简单可压缩系可逆过程的热力学第一定律表述式。对于式(2-8),进行变换得

$$dH = d(U + pV) = TdS + Vdp \quad (2-9)$$

其中, $H = U + pV$ ,也是状态参数,称为焓。

焓是工质通过一个界面时所传递的热力学能与推动功之和。在开口系统中,热力系通常取为固定边界面的系统(控制体),工质处于流动状态,当其通过固定的边界时,至少要传递的能量等于其焓值,所以在开口系中使用焓比使用热力学能更为方便。

在式(2-9)中,令 $\delta W_t = -Vdp$ ,称为技术功,是技术上可以被利用的功,包括内部功和工质机械能等的变化。

## 第二节 热力学第二定律

热力学第二定律是关于热与功转化方向性的定律,热力学第二定律有多种描述方法,其本质都是关于自发过程不过逆性的描述。

考察闭口系的一个微元状态变化,其热力学能变化为 $dU$ ,系统熵变为 $dS$ ,系统热力学绝对温度为 $T$ 。既可以通过可逆过程产生这一变化,也可以通过不可逆过程产生这一变化。若系统在可逆过程中的吸热量为 $TdS$ ,系统对外做功为 $\delta W_R$ ,则有

$$dU = TdS - \delta W_R \quad (2-10)$$

若系统在一个一般热力过程中的吸热量为 $\delta Q$ ,系统对外做功量为 $\delta W$ ,则有

$$dU = \delta Q - \delta W \quad (2-11)$$

由式(2-10)和式(2-11)得

$$dS = \delta S_i + \delta S_g \quad (2-12)$$

$$\delta S_i = \frac{\delta Q}{T} \quad (2-13)$$

$$\delta S_g = \frac{\delta W_L}{T} = \frac{\delta W_R - \delta W}{T} \quad (2-14)$$

式中： $\delta S_f$  为一般热力过程的熵流，J/K； $\delta S_g$  为一般热力过程的熵产，J/K； $\delta W_L$  为一般热力过程的耗散功，J。

热力学第二定律可以表达为：“任何热力过程的熵产都不会小于零”，即

$$\delta S_g \geq 0 \quad (2-15)$$

在式(2-15)中，对于可逆过程取等号，对于不可逆过程取大于号。熵产是热力过程不可逆性的直接度量，从而式(2-15)指出了热力过程的方向性。可以从式(2-15)证明热力学第二定律其他说法的等价性。

当一个热力系与外界之间的一切不平衡势差都不存在时，热力系是孤立系，这时，热力系的熵总是增加的，最后会在熵的极大值点停下来，长期保持不变，这正是热力学平衡态所指明的事实，所以热力学平衡态一定是其内部可能的熵状态中的极大值点。热力学平衡态的存在性类似于力学中的牛顿第一定律，它指出了热力系保持状态不变的条件。与力学中所讲的“力是物体运动状态变化的原因”类似，在热力学中，势差是热力系统状态变化的原因。势差可能导致热力系统与外界之间的物量交换，也可能导致热力系与外界的功量和热量交换。在流体力学和传热学中，主要研究势差与热力系物质、动量、能量交换的速率之间的关系及如何更有效地控制和优化这些传递过程。

### 第三节 卡诺热机的效率

一个热机只能工作于多个热源之间，而且在这些热源中，至少有一个热源是接收热能的，否则就会与式(2-15)矛盾。对于较简单的情况，如图2-1所示的工作于两个温度之间的热机( $T_1 > T_2$ )，由于热机向低温热源放热，从热机工质的角度看，热量 $\delta Q_2$ 本身为负，其绝对值为 $-\delta Q_2$ 。

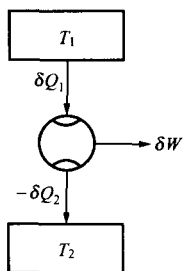


图 2-1 两热源热机工作示意图

当热机经历一个热力循环之后，根据热力学第一定律有

$$\delta W = \delta Q_1 - (-\delta Q_2) \quad (2-16)$$

根据式(2-12)和式(2-15)得

$$\oint \delta S_f = \frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = \oint dS - \oint \delta S_g \leq 0 \quad (2-17)$$

则热机的效率为

$$\eta = 1 - \frac{-\delta Q_2}{\delta Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2-18)$$

当热机为可逆热机时，式(2-18)中等号成立。故两个热源之间的可逆热机（即可逆卡诺热机）的效率为

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2-19)$$

式(2-18)还可用语言表达为：“工作于两个温度之间的热机，其热效率不可能超过可逆卡诺热机的热效率。”这也是热力学第二定律的一种表述形式。



## 第四节 焓

只要热力系与外界之间存在势差，热力系就具有做功的能力。工质的状态不同，其做功能力也不同。热力系经过可逆过程过渡到与环境处于平衡状态时所能做出的最大有用功，称为热力系的焓。所谓“有用功”，是指“可无限转化能量”的意思。

### 一、热量焓

在温度为  $T_0$  的环境条件下，从热源 ( $T \neq T_0$ ) 取出热能  $\delta Q$ ，通过与环境之间的可逆热机所能做出的最大有用功量称为热量焓，用  $\delta E_{x,Q}$  表示，即

$$\delta E_{x,Q} = \delta W_{\max} = \eta_c \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q \quad (2-20)$$

当热源的温度低于环境温度 ( $T < T_0$ ) 时，式 (2-20) 将得出负值，表示从热源取出热量，不但不能做功，而且还要消耗功量，此时习惯上把温度低于环境温度的热源称为冷源。这时，热量焓的绝对值称为冷量焓，即

$$-\delta E_{x,Q} = -\delta W_{\max} = -\eta_c \delta Q = \left(\frac{T_0}{T} - 1\right) \delta Q \quad (2-21)$$

### 二、焓焓

稳定流动工质在只与环境 ( $p_0, T_0$ ) 作用的情况下，从给定状态 ( $H, S$ ) 以可逆过程变化到与环境平衡的状态 ( $H_0, S_0$ ) 时所做出的最大有用功，称为稳定流量工质的焓焓。与闭口系相比，工质在稳定流动的开口系中需要排挤流道中的流体做推动功。在工质做的总功中，扣除了推动功之后才是可以对外输出的技术功。故根据式 (2-2) 得

$$\delta E_{x,H} = \delta W - d(pV) = \delta Q - dH \quad (2-22)$$

工质从环境的可逆吸收热量  $\delta Q = T_0 dS$ 。需要说明的是，工质从环境的可逆吸热过程中，工质的温度与环境温度必须无限小，所以工质的温度等于环境的温度。因此有

$$\delta E_{x,H} = T_0 dS - dH \quad (2-23)$$

写成有限形式为

$$E_{x,H} = (H - H_0) - T_0 (S - S_0) \quad (2-24)$$

式 (2-24) 就是稳定流动工质焓的表达式。

### 三、热力学能焓

闭口系只与环境作用时，从给定状态 ( $U, S$ ) 可逆地过渡到与环境平衡的状态 ( $U_0, S_0$ ) 时，系统所做的最大有用功，称为该状态下的热力学能焓。在闭口系状态下，工质需要排挤环境大气做功，这部分功无法被人们利用，所以应从总功量中扣除。

闭口系从环境中的可逆吸热量  $Q = T_0 (S_0 - S)$ ，热力系排挤大气所做功为  $p_0 (V_0 - V)$ ，根据式 (2-2) 得

$$\begin{aligned} E_{x,U} &= W_{u,\max} = W - p_0 (V_0 - V) = Q - \Delta U - p_0 (V_0 - V) \\ &= T_0 (S_0 - S) - (U_0 - U) - p_0 (V_0 - V) \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad E_{x,U} = (U - U_0) - T_0 (S - S_0) + p_0 (V - V_0) \quad (2-25)$$