



单元机组集控值班员系列教材

DANYUAN JIZU
RELISHEBEI YUNXING

单元机组热力设备运行

主 编 林文孚

副主编 陶素娥 巴珍贵



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



单元机组集控值班员系列教材

单元机组热力设备运行

主 编 林文孚

副主编 陶素娥 巴珍贵



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据从事单元机组集控运行的需要,在简要介绍热力设备运行必需的热工、流体力学与自动调节基本知识的基础上,主要介绍了电厂锅炉、汽轮机设备的基本原理和大型机组热力系统的组成、作用与运行,讨论了单元机组运行调节与启停操作条件、操作步骤与注意事项。

本书供从事单元机组集控运行的电气专业运行人员学习、使用,可作为集控值班员的培训教材,也可供大中专院校电气、集控、热动类专业学生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

单元机组热力设备运行 / 林文孚主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

(单元机组集控值班员系列教材)

ISBN 978 - 7 - 5084 - 5685 - 0

I. 单… II. 林… III. 火电厂—单元机组—热力系统—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094096 号

书 名	单元机组集控值班员系列教材 单元机组热力设备运行
作 者	主编 林文孚 副主编 陶素娥 巴珍贵
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 23.25 印张 551 千字
版 次	2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书根据从事单元机组集控运行的需要，在简要介绍热力设备运行必需的热工、流体力学与自动调节基本知识的基础上，主要介绍了电厂锅炉、汽轮机设备的基本原理和大型机组热力系统的组成、作用与运行，讨论了单元机组运行调节与启停操作条件、操作步骤与注意事项。本书具有以下特点：

1. 基础知识部分突出物理概念。对于热力设备运行的基础理论，如热工学、流体力学、自动控制原理等，主要介绍与锅炉、汽轮机及其热力系统运行密切相关的基本概念。

2. 热力设备部分突出系统。在简要介绍热力设备基本原理的基础上，主要分析了大型机组的热力系统，力求使读者全面地掌握单元机组热力设备及系统的组成、原理、特点、单元机组启停运行，以及运行调节的基本知识，完整地理解单元机组启停生产过程。

3. 内容选取典型，反映了发电工业的新技术。本书中介绍的热力设备和系统，是600MW（或300MW）机组的典型实例，兼顾亚临界机组和超临界机组，以600MW超临界机组为主，突出重点。

4. 简明实用，针对性强。本书是针对从事集控运行工作的电气专业运行人员为对象而写的，可作为集控值班员的培训教材，也可作为电气、集控、热动类专业学生学习、参考。

为了便于读者阅读本书，下面给出每个章节的主要内容和学习提要。

第一章热工学基础知识。主要内容有：工质及基本状态参数、热与功及其转换与守恒；稳定流动的能量方程式与热力学第二定律；水蒸气的产生过程与水蒸气性质表、水蒸气的基本热力过程、蒸汽动力循环；导热、对流放热、热辐射、换热器的基本概念。应主要理解比体积、内能、焓、热量、功、液体热，汽化热，过热热等基本概念，熟悉水蒸气一点、两线、三区 and 五态的物理意义；理解卡诺循环、朗肯循环、再热循环、回热循环的热力过程与经济性；了解传热方式及常用的换热设备的传热特点。本章介绍的内容是单元机组热力设备运行最重要的理论基础。

第二章流体力学泵与风机的基础知识。主要内容有：流体的基本物理性质、流体静力学基本方程、液体运动的基本概念、液体的连续性方程与能量

方程、流动阻力的基本概念；泵与风机基本结构、工作原理与分类、泵与风机的性能及其运行。应主要理解流体的压缩性和膨胀性、粘性、流线、缓变流、位能、比压能、比动能、流动阻力与沿程阻力损失、泵与风机的扬程或全风压、轴向推力、损失与效率、汽蚀、喘振等基本概念；理解能量方程式的意义与应用、阻力损失的产生原因与减小阻力损失的措施；熟悉泵与风机的基本结构与分类，了解泵与风机的基本性能与运行。

第三章自动控制的基本知识。主要内容有：自动调节的基本概念、热工过程控制对象的动态特性、调节器的基本动作规律。应主要理解调节对象、被调量与给定值、扰动、反馈调节与前馈调节、稳定性、准确性、快速性、迟延、惯性、比例调节、积分调节、微分调节、跟踪等基本概念。

第四章锅炉设备及系统。主要内容有：锅炉组成与工作过程、锅炉分类、型号及特性参数，煤的成分、主要特性指标，煤粉的性质及制粉设备，锅炉热平衡及热损失，燃烧基本原理，燃烧设备，锅炉水循环原理、锅炉水处理及蒸汽净化，汽水设备，热偏差、汽温特性及汽温调节。主要应了解煤粉完全迅速燃烧的条件及燃烧各损失产生的原因，理解影响煤粉气流着火燃烧的因素，熟悉燃烧设备的结构与布置，各汽水设备的结构特点、工作特性及典型锅炉汽水系统流程，理解汽温特性与汽温调节方法。

第五章锅炉热力系统及运行。主要内容有：制粉系统、风烟系统、旁路系统、直流锅炉启动系统、暖炉油系统、吹灰系统、除灰系统、脱硫系统等各系统组成及主要设备，各系统启停的基本知识。锅炉生产过程包括炉内过程和锅内过程。炉内过程的学习重点是掌握制粉、风烟、燃烧系统的组成与作用，良好的燃烧条件与燃烧过程基本原理；锅内过程的学习重点是掌握锅炉汽水系统的组成与作用，汽包锅炉与直流锅炉蒸发过程特点，以及影响汽温变化的因素等。

第六章汽轮机设备。主要内容有：汽轮机的型号与分类、汽轮机的基本结构与工作过程，蒸汽在汽轮机中能量的转换过程与汽轮机中存在的各种损失，蒸汽参数变化对汽轮机运行的影响；汽轮机与运行密切相关的转子、汽缸、轴承、叶片、汽封等本体设备；汽轮机的调节及保护系统；凝汽器、除氧器、加热器等主要辅助设备。汽轮机原理的学习重点是理解汽轮机的做功过程与蒸汽参数变化对运行的影响；结构的学习要理解振动、差胀、轴向位移产生的原因及机组安全运行的注意问题；EH油及液压系统的学习要弄清汽轮机组的保安措施与动作过程；辅助设备的学习重点是应理解真空形成原理及维持真空的措施与意义，理解热力除氧原理与除氧过程，弄清加热器的换

热过程。

第七章汽轮机热力系统及运行。主要介绍了大型机组汽轮机冷却水系统、汽轮机润滑油系统与发电机的氢、油、水系统、辅助蒸汽系统、轴封与真空系统、凝结水系统、给水系统、回热抽汽系统与加热器疏水放气系统等，每个系统配有完整的系统图。本章学习要熟悉每个系统组成与作用、系统的走向、水汽（气）流程与流向、设备布置特点。还要注意系统使用的水源、汽源、油源，冷却介质与被冷却介质，从而理解系统间的相互联系。

第八章单元机组运行调节。主要内容有：汽包锅炉给水、汽温、燃烧调节对象的特性与基本调节方案；直流锅炉调节特点与汽温、给水调节方案；炉膛安全监控的意义与典型控制逻辑；汽轮机的转速与负荷控制；单元机组协调控制的基本概念。应在熟悉各相关热力设备与系统，即控制对象的组成原理与运行特性的基础上，弄清调节机构在热力系统中的位置、作用和地位，认识各种扰动对被调量的影响，理解控制方案的基本原理与调节系统的工作过程。

第九章单元机组启停运行。主要介绍单元机组的冷态启动、热态启动，单元机组的停运与运行监视调整，本章是前八章知识的综合运用。应在掌握机、炉主要设备原理、熟悉热力系统的组成、理解各系统启停操作步骤、运行调节方法的基础上，掌握单元机组启动与停止的方式、操作步骤与注意事项。理解机组启停操作顺序，要注意系统间的纵向和横向联系，弄清辅助系统运行状态对机、炉主设备运行的影响。只有站在全局的高度认清每一个具体操作对局部系统、对整个机组运行的可能影响，才能纵览全局、运筹帷幄，保证机组启停过程有条不紊地进行。

本书第一章由武汉电力职业技术学院副教授景朝晖撰写；第二章、第四章、第五章由武汉电力职业技术学院副教授陶素娥撰写；第六章、第七章由武汉电力职业技术学院高级工程师巴珍贵撰写；第三章、第八章、第九章由武汉电力职业技术学院副教授、高级工程师林文孚撰写。本书主编林文孚，副主编陶素娥、巴珍贵。全书由林文孚统稿。

由于编者学识水平有限，加之时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2008年4月

目 录

前言

第一章 热工学基础知识	1
第一节 热力学基本概念.....	1
第二节 热力学基本定律.....	4
第三节 水蒸气	10
第四节 蒸汽动力循环	19
第五节 传热学基本知识	27
第二章 流体力学泵与风机的基础知识	39
第一节 流体的基本物理性质	39
第二节 流体静力学基础知识	41
第三节 液体动力学基础知识	47
第四节 泵与风机的主要参数及工作原理	61
第五节 离心式泵与风机的基本结构	67
第六节 离心式泵与风机的性能	74
第七节 离心式泵与风机的运行工况	81
第三章 自动控制的基本知识	88
第一节 自动控制的基本概念	88
第二节 热工控制对象的动态特性	93
第三节 调节器的基本动作规律与调节系统的实现.....	101
第四章 锅炉设备及系统	107
第一节 概述.....	107
第二节 燃料.....	109
第三节 煤粉制备.....	113
第四节 锅炉燃烧系统及设备.....	122
第五节 锅炉汽水系统及设备.....	138
第五章 锅炉热力系统及运行	162
第一节 制粉系统.....	162
第二节 风烟系统.....	165
第三节 主、再热蒸汽系统与旁路系统.....	169
第四节 暖炉油系统.....	175
第五节 锅炉吹灰系统.....	176

第六节	锅炉除灰系统	178
第七节	脱硫系统	181
第六章	汽轮机设备	185
第一节	汽轮机工作原理	185
第二节	汽轮机的本体结构	199
第三节	汽轮机的调节及保护系统	211
第四节	汽轮机的主要辅助设备	221
第七章	汽轮机热力系统及运行	232
第一节	循环冷却水系统	232
第二节	凝结水系统	237
第三节	给水系统	241
第四节	回热抽汽系统	245
第五节	加热器的疏水与放气系统	248
第六节	轴封与真空系统	251
第七节	辅助蒸汽系统	257
第八节	汽轮机润滑油系统	259
第九节	发电机的氢、油、水系统	263
第八章	单元机组运行调节	271
第一节	汽包锅炉给水调节	271
第二节	汽温自动调节	278
第三节	燃烧过程控制	283
第四节	直流锅炉运行调节	292
第五节	炉膛安全监控	298
第六节	汽轮机转速与负荷控制	305
第七节	单元机组协调控制的基本概念	312
第九章	单元机组启停运行	322
第一节	亚临界汽包炉机组冷态启动	322
第二节	超临界机组的冷态启动	333
第三节	单元机组热态滑参数启动	340
第四节	单元机组停运	343
第五节	机组运行调节中应注意的问题	346
附表一	饱和水与饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	350
附表二	饱和水与饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	351
附表三	未饱和水与过热蒸汽性质表	352
参考文献		361

第一章 热工学基础知识

热能向机械能的转换及热量的传递是发电厂热力设备中的主要工作过程。工程热力学主要研究热能向机械能转换的客观规律，即热力学基本定律，分析工质的基本热力性质，应用热力学基本定律分析计算工质在热力设备中所经历的变化过程，并在此基础上，进一步分析影响能量转换效果的因素，探讨提高火电厂循环热效率的途径与方法。传热学是研究热能传递的科学。由于热能可以自发地从高温物体向低温物体传递，所以，只要存在温差，就必然有热量传递，传热学的主要内容是：以分析传热的三种基本方式为基础，进一步研究实际的复杂传热过程及常用的换热设备的传热特点，最终找出提高传热效果或减少热损失的途径。

第一节 热力学基本概念

一、工质及其基本状态参数

(一) 工质

在热力工程中，热能与机械能的转换以及热量的传递，都是借助媒介物质来完成的，称之为工质。火电机组采用水蒸气作为工质，水在锅炉中吸热生成蒸汽，然后在汽轮机中膨胀推动叶片旋转对外做功，将热能转换成机械能，做功后的排汽在凝汽器中向冷却水放热又凝结成水。

在这一系列过程中，炉膛中的高温烟气是向工质提供热量的高温热源，汽轮机是实现热功转换的热机，凝汽器中的冷却水是吸收工质所释放的废热的低温热源。通过工质的状态变化及它和高温热源、低温热源之间的相互作用实现了热能向机械能的连续转换。

(二) 热力系

作任何分析研究，首先必须明确所研究的对象，具体指定的热力学研究对象称为热力系，如同力学中的隔离体一样。系统外与之相关的所有有关物体统称为外界。一般情况下，热力系与外界总是处于相互作用之中，它们可以通过边界进行物质和能量的交换，物质交换是通过物质流进和流出热力系来实现，能量交换则有传热和做功两种形式。

若系统与外界无物质交换，则称为闭口系。若系统与外界有物质交换，则称为开口系。与外界不发生热交换的热力系称为绝热系。

(三) 基本状态参数

在实现能量转换的过程中，工质的物理特性（状态）随时在发生变化。描述工质状态的一些宏观物理量，称为状态参数，如温度、压力等。常用的热力学状态参数有：温度、压力、比体积、热力学能、焓和熵等。其中压力、温度和比体积都是可以直接测量的物理量，并且物理意义较易理解，常称为基本状态参数。其他的参数，都只能从基本状态参数

间接导出，称为导出状态参数。

对于确定的热力状态，工质的状态参数都有确定的数值，若工质的状态发生变化，则状态参数的值也随之发生变化。

1. 比体积

单位质量的物质所占有的体积称为比体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m}$$

比体积是表示物质内部分子疏密程度的状态参数，比体积越大，物质内部分子之间的距离就越大，物质内部分子就越稀疏。固体、液体、气体比体积逐渐增大。

比体积的倒数称为密度，符号为 ρ 。密度是单位体积的物质所具有的质量，单位为 kg/m^3 。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

2. 温度

温度是标志物体冷热程度的物理量。

温度的数值标尺称温标。常用的温标有摄氏温标和热力学温标。摄氏温标用 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度）。国际单位制中常采用热力学温标，也称开尔文温标或绝对温标，用 T 表示，单位为 K （开尔文）。它们之间的换算关系如下

$$t = T - 273.15$$

3. 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力（物理学中称为压强），以符号 p 表示。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）做压力单位。

在实际压力测量中，压力表的读数是所测工质实际压力 p 与当地大气压力 p_b 的差值。习惯上，称工质的实际压力 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_g ；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 。它们之间的关系由图 1-1 表达，其数学关系为

$$p = p_b + p_g \quad p = p_b - p_v$$

火电机组的设备型号中，通常有表示压力的参数。在不同的设备型号中，其含义不尽相同。例如，在锅炉型号 HG 1021/18.2—540/540 中，18.2 指的是蒸汽的表压力为 18.2MPa；而汽轮机型号 N300—16.7/537/537 中，16.7 指的是新蒸汽的绝对压力为 16.7MPa。

在有些计算中，当工质压力较高时，大气压力的数值可以近似取为 0.1MPa，这样引起的误差是很小的。但是，如果工质本身的压力数值比较小，则大气压力应取当地大气压力值。

二、热力过程与热力循环

处于平衡状态的热力系，若与外界发生功或热的相互作用，则平衡将遭到破坏，状态将发生变化。我们把工质从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态所经历的全部状态的总和

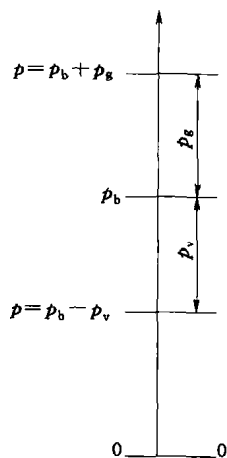


图 1-1 压力关系换算示意图

称为热力过程。

当工质完成某一热力过程后，若仍能沿原来所经历的状态变化途径逆行回复至原状态，并给外界不留下任何影响，则这一过程称为可逆过程。否则，就称为不可逆过程。

工质从某一初态出发，经历一系列的状态变化后又回到初态的热力过程，称为循环。热力循环指的是能连续不断地将热变为功的循环。

三、功和热量

电厂的热力设备中，工质在实施热力过程时，与外界发生的能量交换主要是做功和传热两种方式。

(一) 气体的功与 $p-v$ 图

物理学中把物体通过力的作用而传递的能量称为功，并定义功等于力 F 与物体在力的作用方向上的位移 Δx 的乘积，即

$$W = F\Delta x$$

功的符号用 W 表示。国际单位制中，功的单位采用 J（焦耳）或 kJ（千焦）， $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。1kg 气体所作的功用小写字母 w 表示，单位为 J/kg。

热力设备中工质与外界之间发生功的作用时，是通过工质的体积变化（膨胀或压缩）来实现热能和机械能的相互转换的，这种功称为膨胀功或压缩功，由于他们是通过系统容积变化与外界交换的功，所以也称为体积变化功。

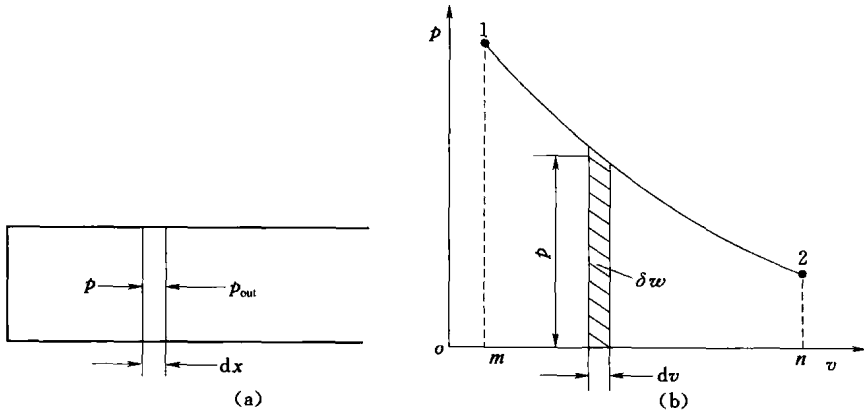


图 1-2 体积比变化功与 $p-v$ 图

(a) 体积功；(b) $p-v$ 图

分析图 1-2 所示气缸中工质在可逆过程中的体积变化功。设气缸内有 1kg 的气体，气体的压力为 p ，活塞表面积为 A ，则作用在活塞上的力就可以表示为气体压力和活塞面积的乘积，即 $F = pA$ 。当气体膨胀推动活塞向右移动一微元距离 dx 时，由于热力系进行的是可逆过程，外界压力必须始终与系统压力相等，则该微元可逆过程中热力系对外界所作的膨胀功为

$$\delta w = Fdx = pA dx = p dv$$

单位质量气体在图 1-2 可逆过程中作的膨胀功为

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv \tag{1-1}$$

在可逆过程中，当系统和外界间传递体积变化功时，功量用状态参数 p 和 v 来描述，其中压力 p 是系统对外作功的推动力，只要系统与外界存在微小的压力差，则两者间就有功量的传递。而比体积 v 的变化则是系统对外作功与否的标志，比体积增大标志系统膨胀对外作功，比体积减小标志系统被外界压缩而获得了功；比体积不变，则标志系统既未作膨胀功也未获得压缩功。

(二) 热量与 $T-s$ 图

系统中工质与外界传递能量的另一种方式是传热。热量的符号用 Q 表示。国际单位制中，热量的单位采用 J (焦耳) 或 kJ (千焦)。1kg 质量的工质与外界交换的热量用 q 表示，单位为 J/kg。

热力学中规定，系统吸热时，热量值取为正；系统放热时，热量值取为负。

热量和功一样，都不是状态参数，而是过程量，其大小都与所经历的过程有关。

常采用与描述功类似的方式来描述热量的传递。热量是系统与外界间由于存在温差而传递的能量，则温度 T 就可看作是传热的推动力，只要系统与外界间存在微小的温度差，就有热量的传递；与比体积 v 相应地也必然存在某一状态参数，它的变化量可以作为系统与外界间有无热量传递的标志，我们定义这个状态参数为熵，用符号 S 表示。单位质量物质的熵称为比熵，用符号 s 表示。比熵增大标志系统从外界吸热，比熵减小标志系统向外界传热，比熵不变则标志热力系与外界无热交换。

因此，与功的关系式相应，在可逆过程中，热力系与外界交换的热量 q 可用式(1-2)来描述，即

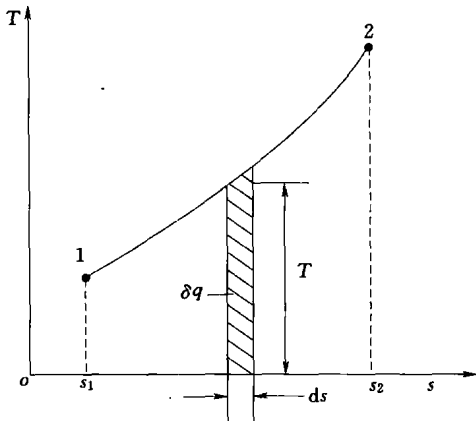


图 1-3 $T-s$ 图

$$\delta q = T ds$$

$$q = \int_1^2 T ds \quad (1-2)$$

式中 δq ——单位质量工质在微元可逆过程中与外界所传递的微小热量；

T ——传热时工质的温度；

ds ——该微元可逆过程中工质比熵的微小变化量。

与 $p-v$ 图相应地有 $T-s$ 图，也称温熵图(图 1-3)。在 $T-s$ 图上可逆过程线下面的面积可表示可逆过程中系统与外界交换的热量。 $ds >$

0 标志热力系从外界吸热，热量为正值； $ds < 0$ 标志热力系向外界放热，热量为负值； $ds = 0$ 表示热力系不吸热也不放热。所以温熵图又称示热图。

第二节 热力学基本定律

一、热力学第一定律

能量转换和守恒定律是人们在长期的生产实践中总结出来的客观规律，它指出：自然界中一切物质都具有能量，能量有各种不同的形式，它可以从一个物体传递到另一个物

体，从一种形式转换成另一种形式，在能量的传递和转换过程中，能量的总量保持不变。

将这一定律应用到涉及热现象的能量转换过程中，即是热力学第一定律。热力学第一定律主要说明热能和机械能在转移和转换时，能量的总量必定守恒。它可以表述为：热可以变为功，功也可以变为热；一定量的热消失时，必然伴随产生相应量的功；消耗一定的功时，必然出现与之对应量的热。

热力学第一定律是工程热力学的基本理论之一，确立了能量传递和转换的数量关系，是热工分析和热工计算的主要理论依据。

(一) 热力学能

工质内部所具有的各种微观能量的总和称为工质的热力学能，它包括内动能和内位能。

工质内部分子热运动的动能称为内动能，它与温度有关。内动能越大，工质的温度越高；反之，内动能越小，工质的温度越低。

由于分子之间的引力而具有的位能称为内位能。内位能与分子之间的距离有关，即与分子的比体积有关。

由于工质的热力学能取决于工质的温度和比体积，即取决于工质所处的状态，因此热力学能也是工质的状态参数。

通常用 U 表示 $m\text{kg}$ 工质的热力学能，单位是 J 或 kJ 。用 u 表示 1kg 工质的热力学能，称比热力学能，单位是 J/kg 或 kJ/kg 。

(二) 焓

在热力设备中，工质的吸热和作功过程往往伴随着工质的流动而进行。例如在火电厂中，给水在流经锅炉各受热面时完成吸热过程，蒸汽在流经汽轮机时完成做功过程等。

先分析图 1-4 所示的气缸中的工质。气缸内有一截面积为 A 的活塞，活塞上置一重物，使活塞产生一垂直向下的均匀压力 p 。对于由气缸、活塞和重物组成的系统，若需将工质送入该系统的气缸，外界就必须克服系统内阻力 pA 而作功，此功称为推动功。

如果将质量为 $m\text{kg}$ 的工质送入气缸内，活塞将上升 h 的高度，则此过程中外界克服系统内阻力对该工质所作的推动功为

$$pAh = pV = mpv$$

式中 pV ——外界对 $m\text{kg}$ 工质作的推动功， J ；
 pv ——外界对单位质量工质作的推动功， J/kg 。

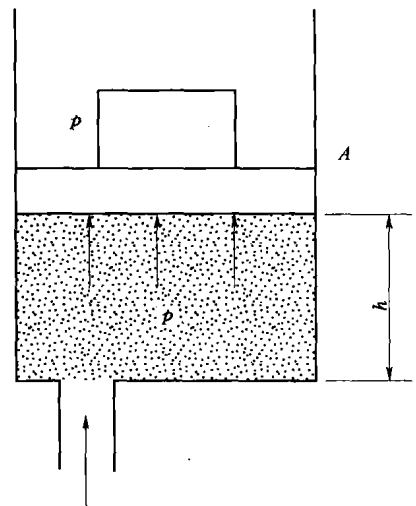


图 1-4 推动功示意图

进一步分析有工质流进和流出的热力设备，如图 1-5 所示。取 1-1 为进口截面，2-2 为出口截面。当一定量工质从 1-1 截面进入系统时，外界需克服 p_1 对热力系作推动功 p_1V_1 ，而当工质从 2-2 截面流出系统时，热力系需对外界作推动功 p_2V_2 。

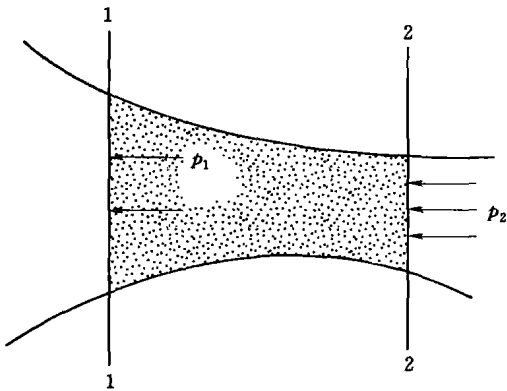


图 1-5 流动净功示意图

显然，推动功不是工质本身具有的能量，它是为推动工质进、出热力系而传递的机械能，是维持工质流动而带入或带出系统的能量。 p_1V_1 是工质流入系统时从外界获得的带给系统的能量， p_2V_2 是工质流出系统时带走的能量。

对于同时有工质流进和流出的开口系，系统与外界交换的推动功的差值，称为流动净功，即

$$\Delta(pV) = p_2V_2 - p_1V_1 = m(p_2v_2 - p_1v_1)$$

流动净功可视为在流动过程中由于工质的进出，系统与外界传递的能量。当工质不

流动时，流动净功为零。

从以上对推动功的分析发现：流动工质进、出热力系时，随一定质量的工质带进或带出热力系的不仅有热力学能，而且还有推动功，这两者通常是同时出现的。为了分析和计算的方便，通常将热力学能和推动功两者合在一起，定义一个新的物理量，称为“焓”，以符号 H 表示，即

$$H = U + pV \quad (1-3)$$

单位质量工质的焓称为比焓，以符号 h 表示，即

$$h = u + pv$$

在国际单位制中，焓的单位为 J 或 kJ，比焓的单位为 J/kg 或 kJ/kg。

从焓的定义式中可以看出， h 由 u 、 p 、 v 三个状态参数组成，因此焓也是一个只取决于工质状态的状态参数，具有状态参数的一切特性。

焓的物理意义可以从它的定义式看出。工质在流动过程中，携带着热力学能、推动功、动能和位能四部分能量。其中只有热力学能 u 和推动功 pv 取决于工质的热力学状态。因此可以说，焓是工质流经开口系时所携带的总能量中取决于热力学状态的那部分能量。如果工质的动能和位能可以忽略不计，则焓就表示随工质流动而转移的总能量。

焓是一个重要的热力学状态参数，在热工分析和计算中，焓的用途远较热力学能为广。

(三) 稳定流动的能量方程式

在正常运行工况或额定工况下，实际的热力设备都是在稳定条件下工作的。例如汽轮机经常保持稳定的输出功率，蒸汽在流经汽轮机时，其热力学状态参数、流速和流量等均不随时间而变化。我们常把热力系内部及边界上各点工质的热力参数和运动参数都不随时间而变化的流动称为稳定流动。

要使流动达到稳定，必须满足以下条件：①流动工质在设备各个截面上的状态参数保持不变；②单位时间内流过设备各个截面的工质流量不变；③系统与外界的能量交换也不随时间而变。

如图 1-6 所示, 表示有工质连续稳定地流过某一系统。设单位时间内有 $m\text{kg}$ 工质由 I—I 截面进入系统, 进口状态参数为: p_1 、 v_1 、 T_1 、 u_1 、 h_1 , 流速为 c_1 , 进口截面 I—I 的面积为 A_1 , 其中心距基准面的高度为 Z_1 。同时经由截面 II—II 开系统的工质的参数相应为: p_2 、 v_2 、 T_2 、 u_2 、 h_2 , 流速为 c_2 , 出口截面 II—II 的面积为 A_2 , 其中心距基准面的高度为 Z_2 。

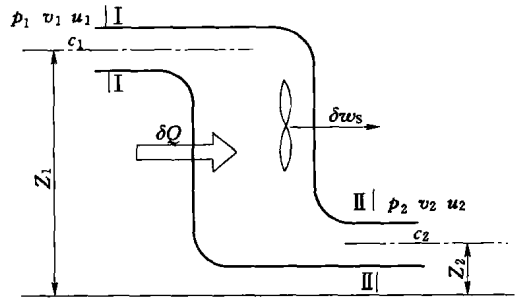


图 1-6 稳定流动的开口系

则在单位时间内 $m\text{kg}$ 工质经进口截面

I—I 流入热力系时带进系统的能量有: ①工质的焓 H_1 ; ②工质的宏观动能 $\frac{1}{2}mc_1^2$; ③工质的重力位能 mgZ_1 。

同理, 单位时间内 $m\text{kg}$ 工质经出口截面 II—II 流出热力系时带出系统的能量有:

①焓 H_2 ; ②动能 $\frac{1}{2}mc_2^2$; ③位能 mgZ_2 。

此外, 在单位时间内, 外界向系统加入热量 Q , 系统向外界输出轴功 w_s 。

根据热力学第一定律, 在稳定流动时, 流入系统的总能量应等于流出系统的总能量, 可以列出能量平衡方程式:

$$H_1 + \frac{1}{2}mc_1^2 + mgZ_1 + Q = H_2 + \frac{1}{2}mc_2^2 + mgZ_2 + w_s$$

整理后可写为

$$Q = (H_2 - H_1) + \frac{1}{2}m(c_2^2 - c_1^2) + mg(Z_2 - Z_1) + w_s$$

对 1kg 工质又可写为

$$\begin{aligned} q &= (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + w_s \\ &= \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta Z + w_s \end{aligned} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 即为热力学第一定律应用于工质在开口系内稳定流动时的数学表达式, 称为稳定流动的能量方程式。

(四) 稳定流动能量方程式应用举例

稳定流动的能量方程反映了工质在稳定流动过程中能量转换的一般规律, 它可广泛应用于分析工质在各种热力设备中稳定流动时的能量平衡及过程中的热功转换情况。在分析具体问题时, 对不同的热力设备和热力过程, 可根据实际过程的具体情况, 对能量方程式作出合理简化, 得到更加简单明了的表达形式。现以电厂中的几种典型热力设备为例说明稳定流动能量方程式的具体应用。

1. 热机

汽轮机是把热能转换为机械能的设备, 工质流经汽轮机时发生膨胀, 对外输出轴功。

在正常工况下运行时，汽轮机的输出功率是稳定不变的，工质流经热机的过程可视为稳定流动过程。

由于工质进、出汽轮机时动能相差不大，可以认为 $\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$ ；进出口高度差很小，使重力位能之差也极小，可忽略，即 $g(Z_2 - Z_1) \approx 0$ ；工质流经汽轮机所需的时间极短，工质向外的散热量很少，所以通常可以认为 $q \approx 0$ 。因此，稳定流动的能量方程式用于汽轮机时可简化为

$$w_s = h_1 - h_2 \quad (1-5)$$

可见，汽轮机对外作的轴功来源于汽轮机进、出口工质的焓降。

2. 换热器

火电厂的换热设备很多，如锅炉、凝汽器、回热加热器和冷油器等。这类设备的主要任务是传递热量，将热量从温度较高的流体传给温度较低的流体。

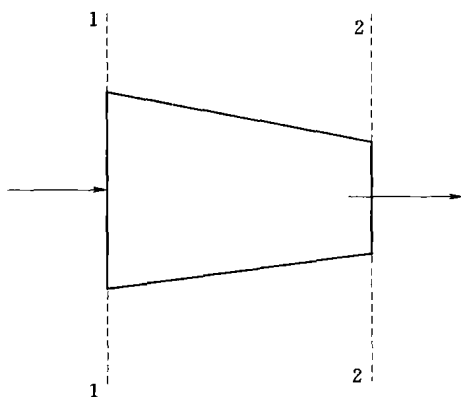


图 1-7 喷管

当工质稳定地流过各种热交换器时，与外界存在热量交换，但无功量交换，动能、位能的变化也可忽略，则能量方程式可简化为

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-6)$$

可见，工质在锅炉等换热器中流动时，吸收的热量等于其焓值的增加。

3. 喷管

喷管是使流体降压增速的特殊短管，如图 1-7 所示。由于气流通过喷管时速度很快，来不及与外界交换热量，可认为流体进行的是绝热稳定流动；由于管内流动无转动机械，气流流过喷

管时对外无轴功输出；同时，进、出口位能差亦可忽略。即 $q = 0$ ， $w_s = 0$ ， $g(Z_2 - Z_1) \approx 0$ 。因此，稳定流动能量方程式可简化为

$$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = h_1 - h_2 \quad (1-7)$$

可见，喷管中工质动能的增加是由工质进出口的焓降转换而来的。

通过上述各例的分析可以看出，在不同的情况下，稳定流动的能量方程式可以简化成不同的形式，因此，如何根据实际过程的具体特点作出相应的简化，是正确运用稳定流动能量方程式的前提。

二、热力学第二定律

热力学第一定律指出了能量转换过程中的数量关系，即能量转换过程中能量的总值守恒不变。热力学第二定律进一步指出不同能量之间自发转换的方向性。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。如此种种，说明能量的转换虽然是守恒的，但自然过程具有方向性，有的方向是自发的，可以无条件进行的，有的方向则是非自发的，要有条件才能进行。有关热功转换的热力学第二定律表示：“不可能

从单一热源吸热，使之全部变为功而不产生其他影响”，或者说，“单一热源的热机是不存在的”。

这个叙述被人类在长期的生产和科学实验中证实。火电机组中，工质从高温热源吸收的热量只能部分地转变为功，而不能全部转变为功，其余的能量被传给了冷源，这是所有发电厂遵循的规律。违背这一规律，火电厂就不能生产。任何动力循环，必须有热源和冷源，工质从热源中吸取的热量只有部分转变为机械能，其余的必须传给冷源，这是热能转变为机械能的条件，也是热力学第二定律反映的客观规律。

(一) 循环的热效率

热力循环变热能为机械能的有效程度称为循环的热效率，用 η_t 表示。循环的热效率 η_t 等于循环净功 W_0 与循环中工质从热源吸入的热量 Q_1 之比，即

$$\eta_t = \frac{W_0}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (1-8)$$

循环的热效率是衡量循环热经济性的重要指标，其值越大表示循环的经济程度越高。

在 $T-s$ 图上， η_t 可用相应的面积之比来表示。如图1-9所示， η_t 等于循环曲线所包围的面积 $1a'2b'1$ 和吸热过程线下的面积 $1a'2341$ 之比。

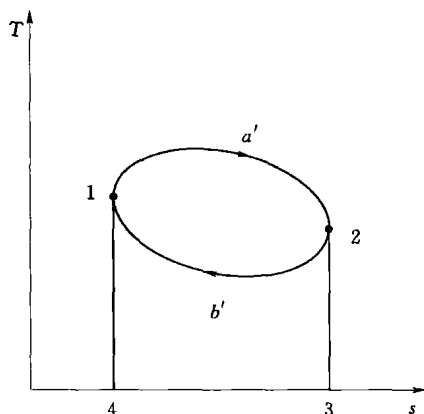


图 1-9 热力循环在 $T-s$ 图上的表示

卡诺循环的热效率为

$$\eta_{t,c} = \frac{W_0}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-9)$$

在两个恒温热源间工作的一切可逆循环，其热效率都相等，都等于相同温限间卡诺循环的热效率。其值只与热源和冷源的温度有关，而与工质的性质无关。在两个恒温热源间

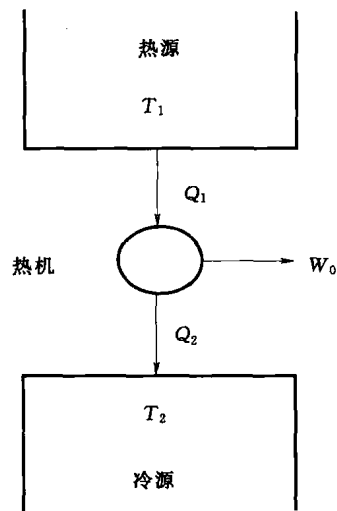


图 1-8 热机的能量转换关系图

(二) 卡诺循环

热力学第二定律表明，任何热机循环的热效率都不可能达到百分之百。那么在一定的具体条件下，热机循环的热效率最高可以达到多少？这个热效率的最高极限取决于什么因素？提高循环热效率的根本途径又是什么？卡诺循环回答了这些问题。

卡诺循环是工作在两个恒温热源间的热机循环，由两个可逆的定温过程和两个可逆的绝热过程组成，如图1-10所示。1-2为可逆定温吸热过程，2-3为可逆绝热膨胀过程，3-4为可逆定温放热过程，4-1为可逆绝热压缩过程。