



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

热工基础

(第二版)

电厂热力设备运行专业

主编 唐莉萍



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

热 工 基 础

(第二版)

电厂热力设备运行专业

主 编 唐莉萍
编 写 刘蓉莉 景朝晖
责任主审 孙保民
审 稿 陈梅倩 李文彦



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是中等电力职业学校火力发电厂热能动力设备运行与检修专业（三年制）的教材，可兼作该专业初、中级工的培训教材，也可供热力工程和有关专业的技术人员参考。

全书共分五个单元，单元下设课题。全书包括工程热力学和传热学两部分内容，主要叙述热力学基础知识，热力学基本定律及应用，水蒸气的热力性质和蒸汽流动规律与计算，蒸汽动力循环的分析与计算；导热、对流换热、辐射换热的基本概念和基本规律；传热的分析与计算，换热器的传热计算和综合分析等。

全书采用中华人民共和国法定计量单位。各课题后附有例题和课堂练习题，各单元后附有小结、复习思考题和习题。

采用本书时，请读者再向出版社购买《水和水蒸气热力性质图表》，以便读者进行热力计算时确定热力状态参数使用。

图书在版编目（CIP）数据

热工基础/唐莉萍主编. —2版. —北京：中国电力出版社，2006

中等职业教育国家规划教材

ISBN 7-5083-4560-6

I. 热... II. 唐... III. 热工学—专业学校—教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 077827 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京同江印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行。各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版

2006 年 8 月第二版 2006 年 8 月北京第十三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 299 千字

印数 50001—54000 册 定价 17.20 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）

电力中等职业教育国家规划教材

编 委 会

主 任 张成杰

副主任 杨昌元 宗 健 朱良镭

秘书长 尚锦山 马家斌

委 员 丁 雁 王玉清 王宝贵 李志丽 杨卫民

杨元峰 何定焕 宋文复 林 东 欧晓东

胡亚东 柏吉宽 侯林军 袁建文 涂建华

梁宏蕴

中等职业教育国家规划教材

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

第三版前言

《热工基础》是教育部 80 个重点建设专业主干课程之一，是根据教育部最新颁布的中等职业学校电厂热力设备运行专业“热工基础”课程教学大纲编写的。

本书以培养学生的创新精神和实践能力为重点，以培养在生产、服务、技术和管理第一线工作的高素质劳动者和中初级专门人才为目标。教材的内容适应劳动就业、教育发展和构建人才成长“立交桥”的需要，使学生通过学习具有综合职业能力、继续学习的能力和适应职业变化的能力。

为了使本课程更好地为专业课奠定基础，同时体现目前我国电力行业发展的新技术、新趋势，本书在修订过程中作了以下修改：①对混合气体，增加了组成气体的状态方程式；②增加了逆向循环和逆向卡诺循环的内容；③增加了滞止参数的概念；④给出了回热循环加热器热平衡的第二种方法；⑤增加了超临界压力机组的概念和超临界压力一次再热循环的 $T-s$ 图；⑥增加了燃气-蒸汽联合循环的内容；⑦增加了管内沸腾换热的内容；⑧对辐射换热的增强与削弱及增强传热的内容做了修订；⑨补充了换热器实物图片；⑩按照有关规定，对部分名词、术语及符号的使用做了相应的修订，对第一版教材中出现的错误进行了更正。

本书由保定电力职业技术学院副教授唐莉萍主编，并修订绪论、第三、四单元；重庆电力公司教育培训中心高级讲师刘蓉莉修订第一、二单元；武汉电力职业技术学院副教授景朝晖修订第五单元。全书由江西电力职业技术学院副教授饶金华主审。

本书可作为中等职业学校（普通中专、成人中专、技工学校、职业高中）教材，也可作为职工培训用书或供热力工程和有关专业的技术人员参考。

编 者

2006 年 5 月

第一版前言

热工基础是中等职业学校电厂热力设备运行专业（三年制）的一门主要专业技术基础课程。它的任务是：使学生具备高素质劳动者和中初级专门人才所必须的热工基本知识和基本技能；为学生学习专业知识和掌握职业技能，提高全面素质，增强适应职业变化的能力和继续学习打下一定的基础。本书是依据国家教委最新颁发的教学计划（试行）和教学大纲进行编写的。

本书遵照国家教委关于中等职业技术教育课程改革的原则和基本思路，力求贯彻以能力为本位的思想，全书采用模块式框架，单元—课题式结构，并针对培养能力的要求，将内容分为五个大模块和若干个小模块。不同工种、不同岗位的学员可根据需要灵活选用。本书注重理论与电厂生产实践相结合，在内容的编排上力求突出针对性和实用性，并以够用为度。例题及课堂练习题主要取材于火电厂 300MW、200 MW 和 600 MW 机组的数据资料。为便于自学，各单元后附有小结、复习思考题及习题，各课题后的例题及课堂练习题是为加强实践环节而设置的。

本书由保定电力工业学校唐莉萍主编，并编写绪论部分及第三单元、第四单元，重庆电力培训中心刘蓉莉编写第一单元、第二单元，武汉电力工业学校景朝晖编写第五单元。由江西电力工业学校饶金华主审。

本书在编写过程中得到了重庆电力教育培训中心黄恩洪老师、长沙电力工业学校吴智储老师的大力支持，谨表谢意。

对于书中存在的缺点和不足之处恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2001 年 6 月

主要符号表

一、工程热力学符号

英 文 字 母			
A	面积；功热当量	s	比熵；位移
C	热容	T	热力学温度
c	质量热容；流速	t	摄氏温度
C_V	容积热容	U	热力学能
C_m	摩尔热容	u	比热力学能
d	比湿度（含湿量）；汽耗率	V	容积
D	过热度	V_m	摩尔容积
F	力	v	比体积
g	重力加速度	W	容积功
H	焓	W_0	循环净功
h	比焓	W_s	轴功
K	热量利用系数	W_t	技术功
l	长度；比汽化潜热	W_f	流动功
M	摩尔质量	w	比容积功
Ma	马赫数	w_i	混合气体的质量分数
M_r	相对分子质量	w_0	比循环净功
m	质量	w_s	比轴功
n	物质的量	w_t	比技术功
p	绝对压力	w_f	比流动功
p_{amb}	大气压力	x	干度
p_g	表压力	x_i	混合气体的摩尔分数
p_v	真空	Z	高度
Q	热量	希 腊 字 母	
q	比热量	α	抽汽率
q_m	质量流量	β	压力比
R	气体常数	ϵ_1	制冷系数
S	熵	ϵ_2	供暖系数
		η	效率

η	循环热效率
κ	定熵指数
γ	质量热容比
ρ	密度
φ_i	混合气体的体积分数

下 角 标

C	卡诺循环
c	临界点状态参数
cr	临界流动的有关量
i	序号
max	最大
min	最小
R	朗肯循环
p	定压
s	定熵
s	饱和状态
T	定温
V	定容

vap	蒸汽
wat	水
x	湿蒸汽
0	标准状态; 基准状态
1	初态; 进口
2	终态; 出口

上 角 标

'	饱和水
"	干饱和蒸汽

顶 标

—	平均
---	----

特 殊 符 号

d	状态参数的微小量变化
Δ	状态参数的增量
δ	过程函数的微小量变化

二、传 热 学 符 号

英 文 字 母

A	面积
a	热扩散率
C	辐射系数
c	质量热容; 流速
d	直径
E	辐射力
G	投入辐射
h	高度
K	传热系数
K_l	单位长度圆筒壁传热系数
l	长度; 比汽化潜热
q_m	质量流量
R	热阻

R_λ	导热热阻
R_c	对流换热热阻
R_r	辐射换热热阻
R_K	传热热阻
T	热力学温度
t	摄氏温度

希 腊 字 母

α	吸收率; 复合换热系数
α_c	对流换热系数
α_r	辐射换热系数
δ	厚度
ϵ	黑度
λ	热导率
μ	动力黏度

ν	运动黏度
π	圆周率
ρ	反射率；密度
τ	穿透率
Φ	热流量
φ	热流密度
φ_l	单位长度圆筒壁的热流量

下 角 标

b	黑体
cr	临界
f	流体

max	最大
min	最小
s	饱和状态
w	壁面

上 角 标

'	进口
"	出口

顶 标

—	平均
---	----

目 录

中等职业教育国家规划教材出版说明

前言

第二版前言

第一版前言

主要符号表

绪论	1
单元一 热力学基础知识	4
课题一 工质、热力状态及基本状态参数	4
课题二 热力过程及参数坐标图	11
课题三 理想气体状态方程式	18
课题四 热容及热量计算	24
小结	29
复习思考题	31
习题	31
单元二 热力学基本定律	33
课题一 热力学第一定律	33
课题二 理想气体的基本热力过程	42
课题三 热力学第二定律	50
小结	60
复习思考题	62
习题	62
单元三 水蒸气的热力性质	64
课题一 水蒸气	64
课题二 蒸汽的流动	79
课题三 空气通过喷管的动力特性演示实验	94
小结	96

复习思考题	98
习题	99
单元四 蒸汽动力循环	100
课题一 朗肯循环	100
课题二 回热循环	108
课题三 再热循环	113
课题四 热电合供循环	118
课题五 燃气—蒸汽联合循环	120
小结	123
复习思考题	124
习题	125
单元五 传热及换热器	126
课题一 传热的基本方式	126
课题二 固体表面黑度的测定实验	151
课题三 传热过程	153
课题四 换热器	163
课题五 换热器实验	173
小结	175
复习思考题	177
习题	178
附录	179
附表一 气体的平均质量定压热容 $\bar{c}_p$ $^{\circ}\text{C}$	179
附表二 气体的平均容积定压热容 $\bar{C}_{p,v}$ $^{\circ}\text{C}$	180
附表三 气体的平均质量定容热容 $\bar{c}_v$ $^{\circ}\text{C}$	181
附表四 气体的平均容积定容热容 $\bar{C}_{v,v}$ $^{\circ}\text{C}$	182
附表五 饱和水与饱和蒸汽性质表 (按温度排列)	183
附表六 饱和水与饱和蒸汽性质表 (按压力排列)	184
附表七 未饱和水与过热蒸汽性质表	186
附表八 几种材料的密度、热导率、质量热容和热扩散率	198
附表九 几种材料在表面法线方向上的辐射黑度	199
参考文献	200

绪 论

一、能源、热能及其利用

能源的开发利用程度是人类社会生产发展的一个重要标志。所谓能源,是指为生产和日常生活提供各种能量和动力的物质资源。在自然界中,可被利用的能源主要有:风能、水能、潮汐能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中,除风能、水能和潮汐能是以机械能的形式被人们利用之外,其余各种能源都往往以热能的形式被人们所利用。显然,人们从自然界能源中获得能量的主要形式是热能。

热能是指组成物质的所有微观粒子作各种不规则热运动时的能量。热能的利用有两种基本方式,一种是直接利用,即将热能直接用来加热物体,如烘干、蒸煮、采暖、焙烧、冶炼等;另一种是间接利用,即将热能转换为机械能,用作生产上的动力,或进一步将机械能转变为电能,如内燃机、喷气发动机、蒸汽动力装置、燃气轮机动力装置、核能动力装置等。由于电能具有传输方便,使用灵活,且易于转变为其他形式的能量等诸多优点,它已成为发展现代社会物质文明的重要条件。在能源的利用中,电能利用占总能源利用的比例已成为国民经济发展水平的标志。

电能可由自然界的各种能源转换而得到,其中火力发电是电力工业的重要组成部分。在我国,2004年的火力发电量为18073亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占全国总发电量的82.7%,在世界上,火力发电约占世界总发电量的80%。预计在今后相当长的一个时期内,火力发电仍将占据主要地位。因此,热能的研究和利用对整个人类的生产和生活有着巨大的意义。

二、火力发电厂的生产过程

利用燃料(煤、石油、天然气等)生产电能的工厂叫火力发电厂,简称火电厂。

火力发电厂的生产过程,就是将燃料中的化学能转换为热能(在锅炉中),再将热能转换为机械能(在汽轮机中),最后将机械能转换为电能(在发电机中)的一系列能量转换过程。

图0-1是以煤为燃料的火力发电厂生产过程示意图。

煤由煤场经输煤皮带送入锅炉制粉系统,经过磨煤机被磨制成煤粉,在热空气的输送下进入锅炉燃烧室内燃烧,生成高温烟气,使燃料的化学能转换为烟气的热能;锅炉受热面将烟气的热能传给水,水受热而蒸发,变成具有一定压力和温度的蒸汽,由此,烟气的热能通过传热就转换为水蒸气所具有的热能;具有一定热能的过热蒸汽进入汽轮机,在汽轮机喷管中降压降温膨胀而形成高速汽流,将蒸汽的热能转换成为动能,具有较大动能的蒸汽冲动汽轮机转子上的叶片,使汽轮机转子旋转,将蒸汽的动能转换成汽轮机轴的回转机械能;汽轮机再带动发电机一起旋转而发出电能,将机械能转换为电能。

做功后的蒸汽在凝汽器中将热量传给冷却水(也叫循环水)而凝结成水,再由水泵升压后经低压加热器、除氧器、高压加热器送回锅炉。如此周而复始,就使燃料燃烧时放出

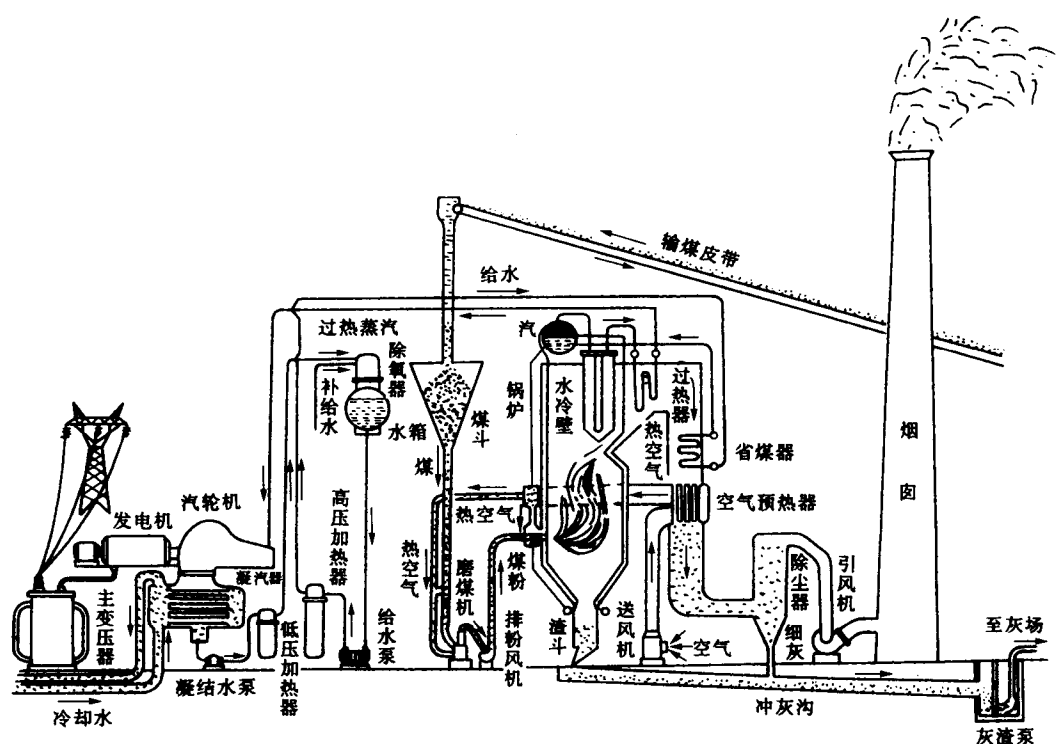


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图

的热能连续不断地转换为电能。

由此可见，火力发电厂主要由两大部分组成，即从燃料的化学能转换为机械能的热力部分和从机械能转换为电能的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机、水泵、加热器以及连接它们的管道等设备，这些设备的组合通常称之为热动力装置或热动力设备。

三、《热工基础》的主要内容及应用

《热工基础》是讲述工程热力学和传热学基础知识的教科书，全书包括五个单元，其中前四个单元属于工程热力学，第五单元属于传热学。

工程热力学是研究热能和机械能之间相互转换规律的科学，它以热力学第一定律、热力学第二定律为基础，着重阐述工质在基本热力过程和动力基本循环中的热功转换规律，最终找出提高转换效率的途径和方法。

传热学是研究热量传递规律的科学。它以导热、对流换热及辐射换热三种换热方式为基础，研究复杂换热的传热过程及常用换热设备的传热特点，最终找出增强传热和削弱传热的途径及方法。

《热工基础》着重研究热、功转换和热量传递等宏观现象，所以，主要应用宏观研究方法，对热现象进行具体的观察和分析，总结出普遍的基本规律。但为了说明热现象的本质及其根本原因，有时也用微观理论进行解释。为分析问题方便，本课程中还常常采用抽象化、理想化及简化的研究方法。

热能与机械能的相互转换及热量的传递是火力发电厂热力设备中的主要工作过程。所以热工基础是动力类专业的一门主要的专业基础课。各种热能动力装置的设计、制造、安装、运行、检修与改进都离不开它所讲述的基本理论。

随着我国国民经济的持续、高速发展，电力工业也必将进入一个高速发展时期。虽然我国电力装机容量和发电量已跃居世界第四位，但我国的发电技术经济指标还比较低，人均占有发电量的水平也较低，因此，我们在开发新能源的同时，必须合理地利用能源，以使我国的能源工业全面地达到或超过世界先进水平。学好《热工基础》可为开发新能源和合理利用能源奠定必要的理论基础。

热力学基础知识

内 容 提 要

热力学,是研究热能转换为机械能的规律和方法的一门学科,在对自然现象大量观察的基础上,采用抽象、概括、理想化和简化的手段,建立热力学讨论方法,提出热力系统、热力过程等概念。本单元介绍基本状态参数、容积功和热量的表示及计算;给出理想气体状态方程式并应用它解决实际问题;讨论了热容的影响因素及利用热容计算热量的方法。本单元主要介绍热力学的基本概念,将会出现较多的名词术语,必须准确理解和掌握,为本课程后续单元及专业课程的学习打下良好基础。

课题一 工质、热力状态及基本状态参数

教学目的

热能转换为机械能是在热力系统中依靠工质完成的。理解工质的概念及特性,正确掌握热力系统的分类,是讨论热力学问题的关键。通过本课题的学习,应掌握基本状态参数的定义及表示方法。

教学内容

一、工质、热机、热源和热力系

热能转换为机械能的装置很多,形式各异,比较典型的有蒸汽动力装置和内燃机装置。

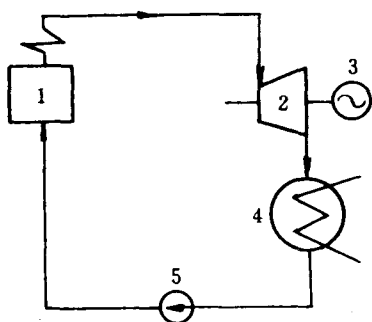


图 1-1 蒸汽动力装置示意图
1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；
4—凝汽器；5—给水泵

火电厂中采用的蒸汽动力装置如图 1-1 所示。燃料（煤或油）在锅炉的炉膛内燃烧后成为烟气，使燃料的化学能转变为热能。锅炉水冷壁内的水吸收了烟气的热量后汽化为水蒸气，水蒸气在过热器内进一步吸收热量而提高温度，成为过热蒸汽，此过程为水和水蒸气的吸热过程。从锅炉的过热器中出来的高温高压水蒸气进入汽轮机的喷管中，降压膨胀，水蒸气的速度增大，使热能转变为水蒸气的动能，接着，这股高速的气流冲击汽轮机叶片而做功，将水蒸气的动能传递给汽轮机转子，使汽轮机的轴转动，将蒸汽的动能转换为汽轮机轴的机械能。此过程是水蒸气的膨胀做功过程。汽轮机带动发电

机发电，将机械能转变成电能。做功后的蒸汽在凝汽器中放热而凝结成水，此过程是水蒸气的放热过程。凝结水由水泵升压后送回锅炉，此过程是水的压缩过程。由上可见，在蒸汽动力装置中，水（水蒸气）经历了吸热、膨胀、放热和压缩等过程，如此周而复始，就将燃料燃烧时放出的热能连续不断地转换为机械能。

内燃机是一种广泛应用于汽车、船舶、机车上的动力装置。如图 1-2 所示，活塞右行时，进气阀打开，排气阀关闭，由雾状汽油和空气组成的混合气体被吸进气缸。活塞在左行时，进、排气阀都关闭，压缩缸内气体，此为压缩过程。当活塞即将接近缸头时，由电火花将燃料引燃，缸内气体压力和温度迅速升高，此为燃烧吸热过程。燃烧后的高温高压气体膨胀，推动活塞右行，将热能转换为机械能，并通过曲柄连杆机构将机械能传递给飞轮和外界，此为膨胀做功过程。当活塞再次左行时，排气阀开启，进气阀关闭，将做功后的燃气排至大气，这部分燃气必然带有余热进入大气，此过程为气体的放热过程。重复进行这些过程，即可连续不断地把燃气通过燃烧得到的热能转换为机械能。

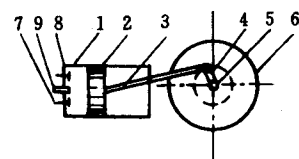


图 1-2 内燃机示意图

- 1—气缸；2—活塞；3—连杆；
4—曲柄；5—机轴；6—飞轮；
7—进气阀；8—排气阀；
9—火花塞

在上述蒸汽动力装置和内燃机动力装置中，将热能连续不断地转换为机械能，都需要借助于某种媒介物质通过压缩、吸热、膨胀、放热四个过程去实现。我们把这种实现热能和机械能相互转换的媒介物质称为工质，例如，内燃机中的燃气、火电厂中的水蒸气等。

为了能够充分地将热能转换为机械能，要求工质具有良好的膨胀性能。同时，为了保证工质连续地流过热力设备而不断地做功，要求工质具有良好的流动性。当然，在物质的固、液、气三种状态中，我们知道，气体物质受热后的膨胀能力最大，流动性也最好，最适宜于作为能量转换的工质。除此之外，作为工质，还要求热力性质稳定、不腐蚀热力设备、无毒、廉价、易获得等。所以，在火电厂中广泛采用水蒸气作为工质。

热能转换为机械能，必须依靠一定的设备（例如汽轮机和内燃机）来完成。这种用来将热能转换为机械能的设备称为热机。

我们把不断向工质提供热能的物体，称为高温热源，简称热源，如锅炉中的高温烟气。将不断接受工质排放的余热的物体，称为低温热源，简称冷源，如凝汽器或大气环境。在热能动力装置稳定运行中，热源不会由于给工质提供热能而温度降低，其热容量可视为无限大，即通常认为热源的温度保持不变。同理，工质放出余热给大气或凝汽器，大气或冷却水的热容量也可以视为无限大，冷源不会由于吸收余热而温度升高，即视为冷源的温度也保持不变。

热能动力装置的工作流程可以概括成：工质从高温热源吸收的热能，一部分在热机中转换为机械能，另一部分排至低温热源，如图 1-3 所示。

在力学中，将研究对象取为分离体，分析它与周围物体的相互作用。同样，在热力学中也要将分析研究的对象从周围物体中分割出来，研究它通过分界面与周围物体之间的能量交换。这种人为分割出来的、由界面包围着的、作为研究对象的物体总和称为热力系统，简称热力系。周围一切与热力系有关的物体，统称外界或环境。热力系与外界的境界