

高等学校教材

舒宏纪 主编

潘延龄 主审

工程热力学和传热学

GONGCHENGRELIXUE

HE CHUANREXUE

大连海运学院出版社

内 容 提 要

本书共分两篇二十章。第一篇为工程热力学，内容包括基本概念、热力学第一定律、热力学第二定律、理想气体的性质和热力过程、水蒸汽的热力性质和热力过程、气体和蒸汽的流动、气体和蒸汽的压缩、气体动力循环、蒸汽动力循环、制冷循环和湿空气等。第二篇为传热学，内容包括导热、对流换热的基本原理、各种对流换热过程的特征及其计算公式、辐射换热、传热和热交换器等。书后附有国际单位制的附表21个和附图4幅。

本书为水运高等学校轮机管理专业（100~120学时）的教科书，也可作为其他动力专业的教材，还可供轮机管理人员和船厂设计人员参考。

工程热力学和传热学

舒宏纪 主编

大连海运学院出版社出版（大连凌水桥）
大连海运学院出版社发行
大连海运学院出版社印刷厂印装

责任编辑：陈崇铨
封面设计：王 艳

开本：787×1092 1/16 印张：25.25 附图4张 字数：604千字
1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷
印数：2000册 定价：4.50元

ISBN 7-5632-0072-x/TK·1

前 言

本书是根据1986年热工课程教学指导委员会对高等工业学校《工程热力学》和《传热学》提出的基本要求和轮机管理专业的特点，在1982年版本的基础上修订编写而成的。

在编写过程中，为满足基本要求和适应本专业要求面宽的特点，对内容作了进一步的精选和增删，对章节的编排作了必要的调整。在第一篇工程热力学中，按照热力学的基本概念、基本定律（热力学第一和第二定律）、工质的热力性质和热力过程以及热力循环这样的顺序，对章节的编排作了重新安排，以便读者对热力学的基本概念和基本定律的实质有正确和全面的理解，并能将其完整地运用于热力过程和热力循环的分析计算；与之相应，在内容上增添了热力学绝对温标、气体动力循环焓分析简介、基本蒸汽动力循环焓分析、蒸汽压缩制冷循环焓分析等，删去了实际气体状态参数间普遍关系式简介和化学热力学简介等。在第二篇传热学中，基本上保持了原体系，但在所属的各章中，对内容的选择和组织安排上，注意了系统的完整性和适当的严密性，在阐述上力求简明扼要。本书中凡打星标“☆”处，在讲授时数不足时可以略去，而不影响讲授的系统性。本书在内容、编排和阐述上，力求便于读者自学。

全书采用“中华人民共和国法定计量单位”，并在附录中列有各种单位换算表。

本书在1979年和1982年由人民交通出版社出版，潘延龄和舒宏纪主编的初版和第二版本中，曾得到王补宣教授、苏长荪教授、杜先之教授、任泽需教授、林发森教授、卢惠民副教授、蔡士鸣副教授、吴克平副教授、吴孟余副教授、金以铨副教授和钱天祉副教授的帮助和指导。对此，编者谨在此表示感谢。

本书由詹宗勉（第十一、十二、十三章）、孟繁炯（第十、十五、十六章）、潘延龄（第九、十四、十七、十八、十九、二十章）和舒宏纪（第一、二、三、四、五、六、七、八章）分章编写。插图由李恒国绘制。全书由主编舒宏纪定稿，由潘延龄主审。曾参加1979年和1982年版本编写工作的还有高万功、刘惠枝、滕元良、阎永健和龚崇龄。

由于编者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，希望广大读者批评指正。

编 者

1989年1月

主 要 符 号 表

拉丁字母

A	焓; 吸收率	m	质量流量
A_0	热量焓	N	功率
a	比焓; 音速; 导温系数	n	摩尔数; 千摩尔数; 多变指数
a_q	比热量焓	p	绝对压力
C	辐射系数	p_0	大气压力
C_f	阻力系数	p_a	表压力
c	质量比热	p_s	饱和压力
c'	容积比热	p_v	真空度; 湿空气中水蒸汽分压力
D	穿透率	Q	热量; 热流量
d	含湿量; 直径	q	单位质量热量; 热流密度
d_e	当量直径	R	气体常数; 热阻; 反射率
d_{cr}	临界绝缘直径	R_m	通用气体常数
E	焓; 辐射力	r	比气化潜热
E_λ	单色辐射力	S	熵
e	比焓	s	比熵
e_h	比焓焓	T	热力学绝对温度
e_q	比热量焓	t	摄氏温度
F	表面面积	t_d	露点温度
f	横截面面积	t_s	饱和温度
G	投射辐射	t_w	湿球温度
g	重力加速度	t_w	壁面温度
H	焓; 高度	U	内能; 湿周
h	比焓; 高度	u	比内能
I_p	定向辐射强度	V	容积
J	有效辐射	v	比容
k	传热系数	W	膨胀功; 循环净功; 可用能; 单位时间质量; 流速; 流量的热容量
k	玻尔兹曼恒量; 绝热指数	W_a	轴功
L	长度	W_t	技术功
l	长度	w	单位质量膨胀功; 比循环净功; 流速
M	摩尔质量; 马赫数	w_g	流速
m	质量	w_a	比轴功
		w_t	比技术功

$X_{i,j}$	表面 i 对表面 j 的角系数
x	湿蒸气的干度
x_i	质量成分
y_i	摩尔成分
z_i	容积成分

ρ	密度; 预胀比
σ	回热度; 表面张力
τ	时间; 切应力
φ	相对湿度
ω	立体角

希腊字母

α	换热系数
β	增压比; 体积膨胀系数; 肋化系数
β_c	流动时的临界压力比
δ	厚度; 速度边界层厚度
δ_t	热边界层厚度
ε	制冷系数; 压缩比; 热湿比; 黑度; 传热有效度
ζ	热损失系数
ζ_w	功损失系数
ζ_e	焓损失系数
η_c	卡诺循环热效率; 压缩机绝热效率
η_f	肋片效率
η_t	循环热效率
η_{oi}	气轮机绝热效率 (相对内效率)
θ	过剩温度
λ	定容升压比; 导热系数; 波长
μ	动力粘度
ν	运动粘度

角标符号

a	空气的
c	临界的
cr	临界的
f	流动的; 流体的; 燃料的
g	气体的; 产生的
i	序号
$i.s$	孤立系统的
j	序号
m	平均的
n	多变过程的
o	环境的; 黑体的
p	定压过程的
s	定熵过程的; 饱和状态的
T	定温过程的; 气轮机的
v	定容过程的; 蒸气的
W	壁面的; 功的

目 录

第一篇 工程热力学

第一章 概论	(1)
第一节 热动力装置中热能转换为机械能的过程 工质.....	(1)
第二节 制冷装置中热量从低温处传递到高温处的过程.....	(2)
第三节 工程热力学的研究对象、任务和方法.....	(3)
第二章 基本概念	(4)
第一节 热力学系统.....	(4)
第二节 热力学平衡态.....	(6)
第三节 热力状态参数.....	(7)
第四节 功和热量的热力学定义.....	(11)
第五节 准静态过程和可逆过程.....	(13)
第三章 热力学第一定律	(20)
第一节 热力学第一定律的实质 储存能量.....	(20)
第二节 容积功.....	(20)
第三节 封闭系统的热力学第一定律 内能.....	(22)
第四节 开口系统的热力学第一定律 焓.....	(24)
第五节 稳定流动能量方程的应用.....	(28)
第四章 热力学第二定律	(35)
第一节 循环 热效率.....	(35)
第二节 热力学第二定律的几种表述.....	(36)
第三节 卡诺循环和卡诺定理.....	(37)
*第四节 热力学绝对温标和提高循环热效率的基本途径.....	(39)
第五节 克劳修斯不等式.....	(42)
第六节 状态参数——熵.....	(44)
第七节 孤立系统熵增原理.....	(49)
*第八节 熵和能量的转换能力.....	(51)
第五章 理想气体的热力性质	(61)
第一节 理想气体的状态方程.....	(61)
第二节 理想气体的比热.....	(63)
第三节 理想气体的内能和焓.....	(68)
第四节 理想气体的熵.....	(69)
第五节 理想气体混合物.....	(72)
第六章 理想气体的热力过程	(81)
第一节 研究过程的目的和方法.....	(81)
第二节 定容过程.....	(82)

第三节	定压过程	(84)
第四节	定温过程	(86)
第五节	绝热过程	(87)
第六节	多变过程	(91)
第七章	水蒸汽的热力性质和热力过程	(98)
第一节	概述	(98)
第二节	水的定压气化过程和水蒸汽的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图	(99)
第三节	水蒸汽表	(103)
第四节	水蒸汽的 $h-s$ 图	(105)
第五节	水蒸汽的基本热力过程	(106)
第八章	气体和蒸汽的流动	(112)
第一节	喷管和扩压管的截面变化规律	(112)
第二节	气体和蒸汽在喷管中的流速和质量流量	(115)
第三节	喷管的设计计算及其在非设计工况下的工作简介	(119)
第四节	摩阻对流动的影响	(122)
*第五节	绝热滞止	(124)
第六节	气体和蒸气的绝热节流	(125)
第九章	压缩机的热力过程	(128)
第一节	单级活塞式压缩机的工作原理	(128)
第二节	单级活塞式压缩机所消耗的机械功和容积效率	(129)
第三节	双级活塞式压缩机的工作过程	(133)
第四节	叶轮式压气机	(135)
第五节	引射式压缩器	(137)
第十章	气体动力循环	(140)
第一节	内燃机的理想循环	(140)
第二节	内燃机理想循环的热效率	(142)
第三节	内燃机三种理想循环的比较	(146)
第四节	内燃机的功率和热效率	(148)
第五节	燃气轮机装置的理想循环	(153)
*第六节	定压加热燃气轮机装置的实际循环	(155)
*第七节	燃气轮机装置实际循环的改善	(157)
*第八节	增压柴油机的理想循环	(159)
*第九节	增压柴油机的热平衡及焓平衡	(161)
第十一章	蒸汽动力循环	(165)
第一节	概述	(165)
第二节	基本蒸汽动力装置的理想循环—朗肯循环	(165)
*第三节	回热循环	(170)
*第四节	热电循环	(172)
第五节	基本蒸汽动力装置实际循环的热力学分析	(173)

第十二章	制冷循环	(185)
第一节	蒸气压缩制冷循环	(185)
第二节	吸收制冷循环	(191)
第三节	热泵	(192)
*第四节	热泵的焓分析	(193)
*第五节	蒸气压缩制冷装置的焓分析	(194)
第十三章	湿空气	(205)
第一节	湿空气概述	(205)
第二节	湿空气的焓和熵	(208)
第三节	湿空气的露点和湿球温度	(209)
第四节	湿空气的 $h-d$ 图	(212)
*第五节	湿空气的典型过程	(214)

第二篇 传 热 学

第十四章	绪论	(220)
第一节	传热学的研究对象及其在动力工程中的重要性	(220)
第二节	热传递的三种基本方式	(221)
第三节	导热过程、对流换热过程、辐射换热过程和传热过程	(221)
第十五章	导热	(227)
第一节	傅立叶定律和导热系数	(227)
第二节	导热微分方程	(229)
第三节	平壁稳定导热	(232)
第四节	圆筒壁的稳定导热	(235)
第五节	肋壁导热	(237)
*第六节	不稳定导热	(241)
第十六章	对流换热原理	(249)
第一节	对流换热的基本概念	(249)
第二节	对流换热过程的数学描述	(251)
*第三节	对流换热过程的分析求解	(256)
*第四节	对流换热的类比求解	(262)
第五节	对流换热的实验求解	(265)
第十七章	各种对流换热过程的特征及其计算公式	(273)
第一节	受迫对流换热	(273)
第二节	自然对流换热	(279)
第三节	蒸汽凝结换热	(280)
第四节	液体沸腾换热	(283)
第五节	增强对流换热的几种措施	(285)
第十八章	辐射换热	(289)

第一节	热辐射的基本概念	(289)	
第二节	热辐射的基本定律	(291)	
第三节	物体间的辐射换热	(296)	
*第四节	气体辐射和火焰辐射	(303)	
第十九章	传热	(307)	
第一节	通过平壁和圆筒壁的传热	(307)	
第二节	通过肋壁的传热	(309)	
第三节	热绝缘的应用	(311)	
*第四节	热管	(314)	
第二十章	热交换器	(318)	
第一节	间壁式热交换器的类型	(318)	
第二节	热交换器的热计算公式和污垢系数	(322)	
第三节	平均温压	(324)	
第四节	换热器的热计算及其实例	(329)	
附录	(340)	
附表 1	单位换算表	(340)	
附表 2	饱和水与饱和水蒸汽的热力性质表 (按温度排列)	(341)	
附表 3	饱和水与饱和水蒸汽的热力性质表 (按压力排列)	(343)	
附表 4	未饱和水与过热水蒸汽的热力性质表	(345)	
附表 5	R12 饱和液体和饱和蒸气表	(349)	
附表 6	R12 过热蒸气表	(352)	
附表 7	R22 饱和液体和饱和蒸气表	(356)	
附表 8	R22 过热蒸气表	(358)	
附表 9	饱和空气表	(362)	
附表 10	固体金属的热性质	(364)	
附表 11	非金属材料的热性质	(365)	
附表 12	空气的热物理性质	(366)	
附表 13	烟气的热物理性质	(366)	
附表 14	饱和水的热物理性质	(367)	
附表 15	干饱和水蒸汽的热物理性质	(368)	
附表 16	过热水蒸汽的热物理性质	(369)	
附表 17	常用油类的热物理性质	(369)	
附表 18	常用制冷剂饱和蒸气的热物理性质	(370)	
附表 19	常用材料的表面黑度	(372)	
附表 20	不同表面对太阳辐射和一般热辐射的吸收率	(373)	
附表 21	晴天在纬度 40° 处的太阳照射力 E_s	(373)	
参考书目	(374)	
附图 1	水蒸汽的焓—熵图	附图 2	R12 的压—焓图
附图 3	R22 的压—焓图	附图 4	湿空气的焓—湿图

第一篇 工程热力学

热力学是由物理学中的热学发展而形成的学科，是研究热能和以其它形式的能量（如机械能、化学能、电能等）相互转换规律的。工程热力学是热力学的一个分支，是从工程应用的角度研究热能和机械能相互转换规律的。最初，它仅限于研究如何提高热机的热效率。近年来，随着科学技术的发展，工程热力学的应用范围日益扩大，不但继续应用于热机、制冷、热泵和空气分离等传统工程中，而且还进一步应用于宇宙航行、海水淡化、防止环境污染和新能源开发等新技术领域中。工程热力学已成为现代工程热物理中的主要学科之一。它是热能动力类专业的一门重要技术基础课程。

第一章 概 论

本章扼要介绍在热能动力装置中热能转换为机械能的过程、工质和在制冷装置中热量从低温处传向高温处的过程，以便于了解工程热力学的研究对象、任务和方法，便于在后续各章节中联系实际进行热力学分析。

第一节 热能动力装置中热能转换为机械能的过程 工质

一、往复式内燃机

图 1-1 为四冲程内燃机工作原理示意图。图中 a) 为吸气冲程，活塞自上向下运动，进气阀开，新鲜空气经进气阀进入气缸；b) 为压缩冲程，活塞由下向上运动，此时进、排气阀均关闭，空气在气缸内被压缩到高温高压状态；c) 为燃烧和膨胀冲程，当活塞在上死点附近时，从喷油嘴喷入气缸的燃油进行燃烧，燃烧形成的高温、高压的燃气发生膨胀，推动活塞自上向下运动而对外做功；d) 为排气冲程，活塞自下向上运动，排气阀开，气缸中作完功的废气经排气阀排入大气。四冲程内燃机周而复始地完成上述四个冲程，使燃油燃烧所产生的热能中的一部分转换为内燃机曲轴的机械功。

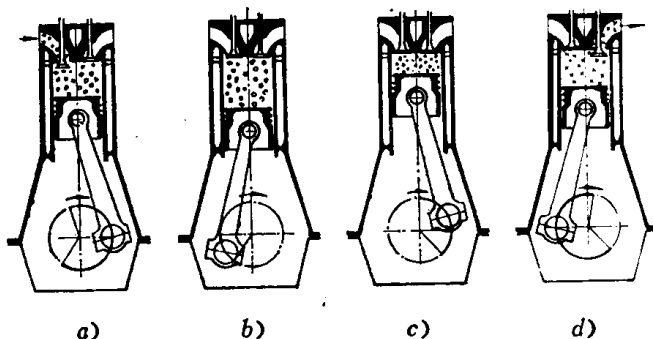


图1-1 四冲程内燃机工作原理示意图

二、蒸汽轮机动力装置

图1-2为蒸汽轮机动力装置示意图。燃油在蒸汽锅炉的炉膛中燃烧。给水在预热器1中被加热后流入汽包2，再流入沸水管3中被燃气加热而形成湿蒸汽。湿蒸汽在过热器4中进一步被燃气加热而成为温度更高的过热蒸汽。过热蒸汽进入蒸汽轮机5中进行膨胀做功。由蒸汽轮机排出的废汽进入冷凝器6，在此被冷却凝结为水，然后由水泵7压入锅炉。可见，蒸汽轮机动力装置，是通过水和水蒸汽在锅炉中吸热 Q_1 ，在冷凝器中放热 Q_2 ，而由蒸汽轮机对外作机械功 W 的。

上述两种热能动力装置，虽然在结构和工作原理方面不同，但从能量转换的关系上来看，都是将燃料燃烧时所发出的热能的一部分转换为机械能的装置。

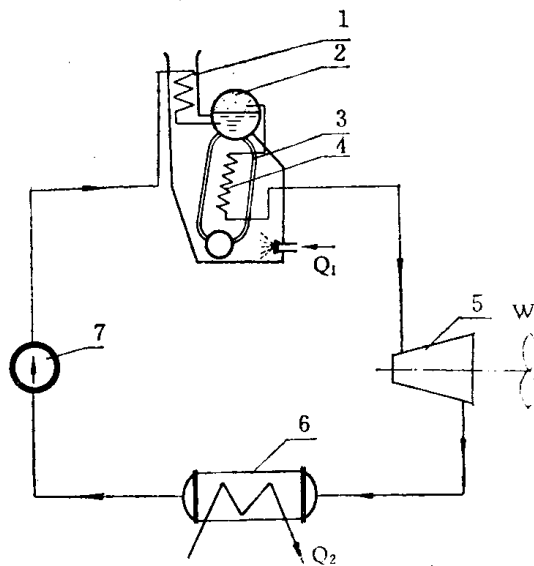


图1-2 蒸汽轮机动力装置示意图

1—预热器；2—汽包；3—沸水管；4—过热器；
5—蒸汽轮机；6—冷凝器；7—水泵

三、工质

在热能动力装置中，把热能转变为机械能是由受热而膨胀做功的媒介物来实现的，这种媒介物称为工质。例如燃气是内燃机的工质，水和水蒸汽是蒸汽动力装置的工质。作为工质的物质必须具有良好的膨胀性和良好的流动性。所以，热能动力装置所用工质为气态物质，如空气、燃气和蒸汽。

第二节 制冷装置中热量从低温处传递到高温外的过程

制冷装置的类型很多，常用的为蒸气压缩制冷装置。由图1-3可见，活塞式压缩机1把

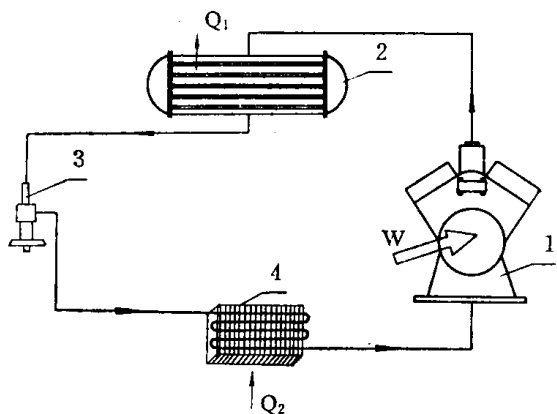


图1-3 蒸气压缩制冷装置示意图

1—压缩机；2—冷凝器；3—膨胀阀；4—蒸发器

低温低压的气态制冷剂压缩为高压常温的蒸气。这种蒸气进入冷凝器2放热 Q_1 给大气或冷却水，并凝结为高压常温的液体。液态制冷剂经过膨胀阀3时压力突然降低，一部分液体气化，并因需要气化潜热，制冷剂急剧降温。这样，制冷剂经过膨胀阀后就变为低压低温的气液共存的混合物。当制冷剂进入冷库中的蒸发器4时，它由于吸热 Q_2 而全部气化，又变为低压低温的气态制冷剂而被压缩机吸入。

制冷剂在制冷装置中循环的效果是从冷库吸收热量 Q_2 ，而通过压缩机把这部分热量在冷凝器中传递给温度较高的大气或冷却水。制

冷装置所花费的代价是压缩机所消耗的机械能 W 。可见，从低温处向高温处传递热量，必须消耗外界的能量（机械能、电能等）。

第三节 工程热力学的研究对象、任务和方法

由以上两节的讨论可知，无论热能动力装置或制冷装置都是实现能量转换的热力设备。工程热力学，作为它们的理论基础，就是从工程应用的角度研究热能与机械能相互转换的规律。能量转换所必须遵循的基本规律有两条：热力学第一定律和热力学第二定律。

热力学第一定律是普遍适用的能量转换和守恒定律在热力学系统中的应用，它说明各种形式的能量可以相互转换，并在转换时数量上是守恒的。例如，在热能动力装置中，工质所吸收的热量 Q_1 与放出的热量 Q_2 之差（ $Q_1 - Q_2$ ）就转换为对外界作的机械功 W ，按热力学第一定律， $Q_1 - Q_2 = W$ 。

热力学第一定律是热能和机械能相互转换时所必须遵循的基本规律。但是，热力学第一定律所允许的能量转换过程并不是全都可以实现的。例如，在热能动力装置中，工质不可能将燃料燃烧所产生的热能 Q_1 全部转换为机械能 W ，而只能将其中的一部分转换为机械能，其余部分不可避免地传递给了周围环境（大气或海水）。这是因为在各种形式的能量中，热能是一种特殊形式的能量。热能是分子热运动所具有的能量，它是不规则运动的能量，而机械能则是物体整体运动所具有的能量，因而是规则运动的能量。所以，将热能转换为机械能，即把不规则运动的能量转换为规则运动的能量，只能通过工质的受热膨胀来实现。因此，热能转换为机械能是有条件的，有限度的。热力学第二定律则是研究热能和和其它形式能量相互转换时的方向、条件和限度。

工程热力学还要研究工质的性质。由于工程热力学只研究热能和机械能相互转换的规律，因此本课程仅研究工质受热膨胀的性质，而不涉及工质的电磁等性质。

工程热力学的任务就是通过对热能和机械能转换规律（包括转换条件和限度）以及工质性质的研究，找出提高热能利用经济性的最有效的途径。可见，工程热力学与节能是密切相关的。

工程热力学所研究的是我们能直接观察到的宏观现象。它的研究方法是从能量的观点出发，依据由经验所建立的热力学第一和第二定律，以及有关工质性质的实验数据，得出一系列有关热功转换的计算公式，供分析和计算使用。因为这种研究方法只是依据经验定律和数学推导，没有作任何人为的假设，所以由此而得到的结论和计算公式十分可靠。它的缺点是没有研究物质的微观结构，因而只能从实验得出结论而无法说明这一结论的物理本质。因此，热力学的研究方法限定了热力学理论只是从宏观方面研究热现象的理论，它只回答“是什么”，而不能回答“为什么”。从微观方面来研究热现象的理论是统计物理学，它是从物质的微观结构的假设出发，应用微观粒子运动的力学定律和统计方法来研究物质的热性质。由于统计物理学更深入到微观现象的本质，所以从其基本原理出发也可导得热力学第一、第二定律和工质的性质，这就可以透过宏观现象阐明其物理本质。不过统计物理学的缺点是，在推导过程中要对物质结构模型作一些简化或假设，因此从理论上得出的结果就与实际情况有相当大的差别。本书以宏观方法为主，对宏观的结果只作适当的定性的微观解释。

总之，工程热力学的研究对象、任务和方法可作如下概括：

“工程热力学是从工程应用的角度研究热能和机械能的转换规律和工质的性质，找出提高能量利用经济性的最有效途径，它使用的是宏观方法”。

复习思考题

1. 内燃机动力装置与蒸汽轮机动力装置的不同点和共同点各是什么？
2. 什么叫工质，工质应具有的基本特性是什么？
3. 热能与机械能在本质上的不同点是什么？
4. 机械能转换为热能是否必须通过工质的膨胀才能实现？

第二章 基本概念

在热力学中，从能量转换的实际情况出发，经归纳和概括，建立了一些基本概念，目的是从宏观观点来研究能量转换的规律。本章围绕着热力学系统的状态和状态变化的描述，介绍热力学平衡态、热力状态参数、功、热量、准静态过程和可逆过程等基本概念。正确理解和掌握这些基本概念，对学会热力学的分析方法并用来解决工程实际问题是很重要的。

第一节 热力学系统

以蒸汽轮机动力装置为例，其中的锅炉、汽轮机、冷凝器和水泵等，从热力学的观点来看，都是相互作用的、实现能量转换或传递的热力设备。为了进行热力学分析，首先要在相互作用的各种热力设备中划分出一个（或几个）热力设备作为研究对象。在热力学中，这种被划分出来的研究对象称为“热力学系统”，或简称“系统”。系统之外的其他热力设备统称为“外界”。系统与外界的分界面称为“边界”。边界在图上通常用虚线标出，它可以是真实的，例如取压缩空气瓶内的空气为系统，瓶的内壁面就是真实的边界；也可以是设想的，例如取汽轮机气缸内的空间为系统，则进出口处的边界是设想的。边界可以是固定的，也可以是移动的。

系统在热力学中的地位与“隔离体”在力学中的地位是相当的。在力学中，首先要在相互作用的许多物体中选定一个（或几个）物体作为隔离体，把其它物体对隔离体的作用算作外力，然后进行力学计算。同样，在热力学中，首先要在相互作用的各种热力设备中选定一个（或几个）设备作为系统，判定系统与外界之间相互作用的性质，然后对系统的能量转换情况进行热力学分析。可见选定系统，弄清系统与外界相互作用的性质，是正确进行热力学分析的基本前提。

力学中的隔离体与其它物体的相互作用只有一种，就是力的相互作用。可是，热力学中的系统与外界的相互作用要复杂得多，一般说来有三种相互作用：系统与外界的物质交换，功的交换和热的交换。按照系统与外界相互作用的特点，在热力学中往往把系统分为下述几类。

开口系统：系统与外界有物质的交换。例如把汽轮机的气缸选作系统，它有工质的流入和流出，这就是开口系统，如图 2-1 所示，开口系统是由闭合表面包围的空间的一部分。开口系统与外界可以有热和功交换，也可以没有。

封闭系统：系统与外界没有物质的交换。例如把内燃机气缸中正在进行膨胀的燃气选作系统。尽管燃气会从气缸与活塞的缝隙间漏泄一点，但漏泄量极小，可以足够精确地看作与外界没有物质交换，这就是封闭系统，如图 2-2 所示。封闭系统是由闭合表面包围的质量恒

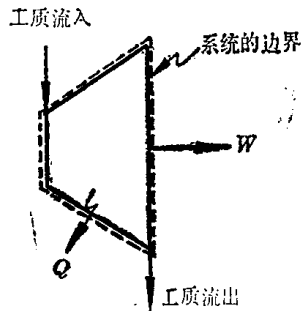


图2-1 开口系统

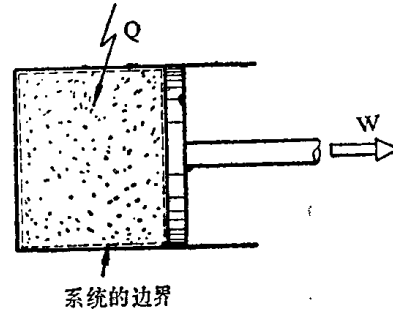


图2-2 膨胀中的燃气

定的物质集合。又如取流动中一定质量工质作为系统，虽然它在流动，但想象人们一直跟随它运动，由于它的质量始终不变，与外界没有物质交换，也是封闭系统，如图 2-3 所示。

绝热系统：系统与外界没有热量的交换。图 2-1 所示的汽轮机如包以绝热材料，当工质流经汽轮机时，其散热量比传输给外界的功量小到可略而不计时，则此开口系统可认为是绝热系统。又如图 2-2 中的燃气膨胀时有热传给冷却水，如取燃气和冷却水(通常称为冷源)为系统，则包括燃气和冷却水的系统与外界没有热交换，因而该系统为绝热系统，如图 2-4 所示。

孤立系统：系统与外界既没有物质交换，也没有热和功的交换。如果把所有发生相互作用的各种设备作为一个整体，并把这个整体选定为所研究的系统，虽然这个系统内部的各部分可以有物质交换、热和功的交换，但这个系统作为一个整体与外界没有任何相互作用，那末这个系统就是孤立系统。如图 2-5 所示，把蒸汽动力装置和接受功的装置作为一个整体，

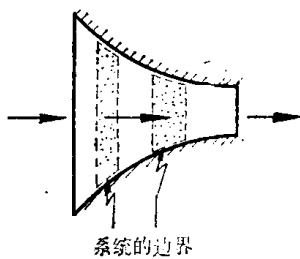


图2-3 流动中的工质

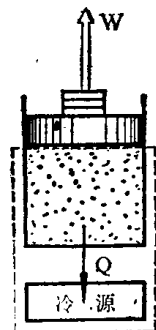


图2-4 把冷源包括在内的绝热系统

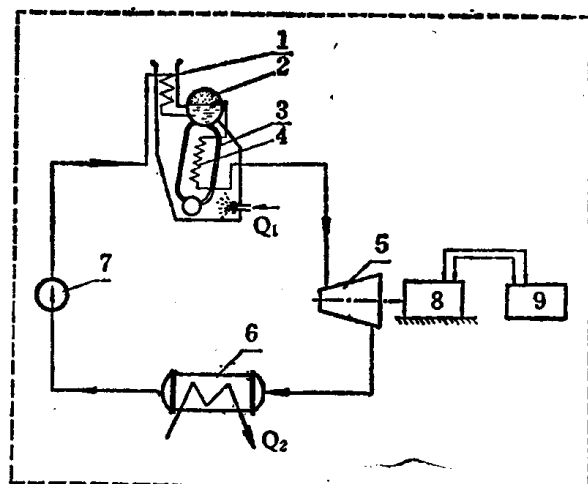


图2-5 孤立系统示例

1—预热器；2—汽包；3—沸水管；4—过热器；5—蒸汽轮机；6—冷凝器；7—水泵；8—发电机；9—蓄电池

就是孤立系统。实际上，与外界绝对不发生任何相互作用的孤立系统是不存在的。当实际存在的系统与外界的能量交换和物质交换削弱到可以略而不计时，可近似地当作孤立系统来处理，所以孤立系统只是一种理想的极限情况。但是，孤立系统的概念对于分析问题很有用。例如在图 2-6 中，物体 A 和 B 的温度分别为 T_1 和 T_2 ，若要计算两物体进行热传递最后达到的平衡温度是多少，可取 A 和 B 为孤立系统，则 A 放出的热量应等于 B 吸收的热量，由此列出热平衡方程求出平衡温度。

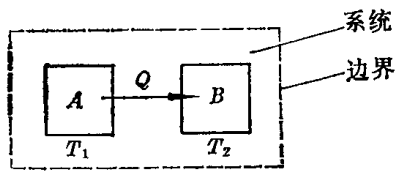


图2-6 孤立系统内两物体间的热传递

第二节 热力学平衡态

为了对系统中能量转换的情况进行分析计算，首先需要对系统的热力状态进行描述。在热力学中，把描述系统宏观特性的物理量称为系统的热力状态参数，简称状态参数。为了简化对系统热力状态的描述，即只用很少几个状态参数来描述系统，提出了热力学平衡态这一重要概念。

先讨论两个具体例子。在一个与外界隔热良好的量热器内，将冷热程度不同的水加以混合，冷水将变热，热水将变冷；经过足够长的时间，水的冷热程度将到处均匀一致，而且此后不随时间而变。再看一个例子，如图 2-7 所示，在与外界隔热良好的封闭气缸内用活塞将压力不同的两种气体 A 和 B 分隔开，设 A 的压力大于 B 的压力；如活塞与气缸间无摩擦，则活塞将向右移动，A 的压力下降，B 的压力升高；经过足够的时间，A 和 B 将达到某一平衡压力，活塞停止移动，而且此后 A 和 B 将保持这一压力不变。

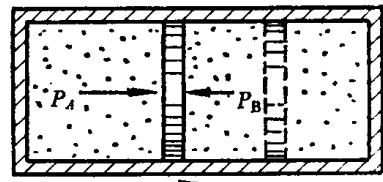


图2-7 压力平衡

将上述两例中的冷热水和气体 A、B 分别取为封闭系统，那末当其与其外界没有相互作用时，系统内原先存在的压力差和冷热不均匀的状态将随时间的推移而自发地趋于到处均匀一致，而且系统的这种状态将不再随时间而变。热力学平衡态，简称平衡态，它的定义为：

“在没有外界影响的条件下，如封闭系统的状态不随时间而变，则该系统处于热力学平衡态”。

系统的平衡态与非平衡态相比较，前者的描述最为简单。这是因为：其一，平衡态与时间无关；其二，处于平衡态的系统，其内部的压力和冷热程度都是均匀一致，对应于系统的每一平衡态，有一个而且只有一个压力和一个描述系统冷热程度的状态参数——温度。反之，不平衡态则不仅与时间有关，而且系统内部状态是不均匀的，因此描述系统的不平衡态极其复杂。大多数热力设备所处的状态，只要系统选定得恰当，均可看作平衡态。因此，平衡态是工程热力学的一个重要的基本概念。工程热力学只讨论处于平衡态的系统。非平衡态热力学是一个专门的学科，本书不讨论这个问题。以后，凡不致混淆时，所提到系统的状态均指平衡态。

下面简要地讨论一下系统处于平衡态的条件。对没有外界影响的封闭系统而言，只要系统中有压力差或冷热程度不均匀，系统的状态就会自发地发生变化，因而处于非平衡态。压

力差或冷热程度不均匀是系统状态发生变化的推动力，在热力学中称为“不平衡势”。可见，系统处于平衡态的条件就是系统内部不存在不平衡势。当系统内部压力均匀一致，则系统处于力学或机械平衡状态；当系统内部冷热均匀一致，则系统处于热平衡状态。在不发生化学反应的系统内，如同时满足力学平衡条件和热平衡条件，则系统处于热力学平衡态。

如封闭系统内部的各种状态参数在空间的分布都是均匀一致的，则该系统称为均匀系统。系统中每个均匀的部分称为“相”。所以，均匀系统是由单相组成的。由两个或两个以上的相所组成的系统为非均匀系统。例如，由水和水蒸汽组成的系统就是两相的非均匀系统，在两相（液相和汽相）的分界面上，密度发生突变。在大多数情况下，处于平衡态的系统为均匀系统。但非均匀系统在一定条件下也能处于平衡态。例如，由水和水蒸汽组成的两相系统，在给定压力的条件下，存在着一个对应的温度，使水汽两相系统处于平衡态；又如，由冰、水和水蒸汽组成的三相系统存在着唯一的一个平衡态，这就是水的三相点（压力为 0.000611MPa ，温度为 0.01°C ）。

如系统内的状态参数不随时间而变，则该系统处于稳态。通常，处于稳态的系统不一定处于平衡态。例如，一根金属棒一端与热的电炉接触，另一端与冷的冰接触，当这根棒内任意一点的温度不随时间而变时，取该棒为封闭系统，则该系统处于稳态。但该系统内部各点的温度并不是均匀一致的，因而处于非平衡态。既然处于非平衡态，为什么各点温度不随时间而变呢？这是因为系统与外界有热的相互作用。

第三节 热力状态参数

由上节讨论可知，对于处于平衡态的任一系统，只需用确定的压力和温度等很少几个状态参数来描述它。在工程热力学里，常用的状态参数有六个，即压力、温度、容积、内能、焓和熵。它们的定义和意义，以后将逐个介绍。工程热力学里之所以引用这些状态参数，是因为它们全都直接或间接地与系统的能量或能量转换有关。

状态参数的数值由系统的状态唯一确定。当系统从初态变为终态时，状态参数的变化量，只与系统的初、终状态有关，而与变化的途径无关。因此，状态参数是系统状态的单值函数或点函数，状态参数的微元变量是全微分。这是判断某一参数是否为状态参数的充分和必要条件。热力学中，还有一类参数，它们的变化量不仅与系统的初、终状态有关，而且与变化的途径有关。这类参数不是状态参数，而是路径函数，它们的微元变量不是全微分。功和热量是这类参数的例子。

系统的状态参数依照其特性可分为两类：“尺度量”和“强度量”。尺度量是描述系统总体特征的状态参数，如系统的总容积、总摩尔数和总内能等，其数值为系统中各部分数值的总和，具有可加性。对于均匀系统，尺度量的数值与系统的质量成正比。强度量是描述系统内各点特征的状态参数，如系统的压力和温度，其数值与系统的质量无关，具有不可加性。对于均匀系统，强度量的数值在空间的分布是均匀一致的。在非平衡态的系统中，强度量的数值在空间的分布不是均匀一致的，如压力差和温度差，这就是不平衡势。

在状态参数中，工程上把可直接观察和测量的称为基本状态参数，它们是压力、温度和比容。下面，分别详细加以介绍。

一、压力

在工程热力学中，把工质指向系统表面（真实的容器壁面或假想的分界面）单位面积上的垂直作用力，称为压力（即压强）。分子运动论把气体的压力看作是气体分子撞击壁面的宏观表现。实际上，容器内的气体分子非常之多，撞击也非常频繁，因此就产生了一个持续的有一定大小的压力，这个压力就是大量分子撞击壁面的平均结果。按分子运动论的观点，气体的压力等于单位容积内的分子数与分子的平均移动动能乘积的 2/3。

1. 压力的单位

压力 p 的单位是由压力的定义式

$$p = \frac{P}{f}$$

来确定的。上式中， P 为工质指向表面的垂直作用力， f 为表面面积。由于力 P 和面积 f 选用的单位不同，压力的单位也不同，它们之间的换算关系见附表 1。根据“中华人民共和国法定计量单位”（简称法定单位），压力的单位为 N/m^2 ，称为“帕”，符号为 Pa。由于 Pa 这一单位所表示的压力太小，实际应用时可用 MPa (10^6 Pa) 作为压力单位。

2. 大气压力

大气压力是由地面上几百公里高的空气层的重量引起的，以符号 p_b 表示。大气压力的大小随纬度、高度以及空气的温度和水蒸汽含量而变化。历史上，物理学中把纬度 45 度平均海平面上常年大气压的平均值定为标准大气压，以符号 atm 表示。现已规定 $1 \text{ atm} = 0.101325 \text{ MPa}$ 。

3. 表压力、真空度、绝对压力

系统的压力可用压力表来测定，并以大气压力作为测量的基准。由压力表测得的压力数值称为“表压力”，以 p_g 表示。系统的实际压力数值称为“绝对压力”，以 p 表示。用压力表测得的压力数值不是绝对压力，而是绝对压力与当地大气压力的差值，即

$$p_g = p - p_b \quad (2-1)$$

例如，在图 2-8 的排出管上，用 U 形管压力计测得的排出压力 $p_g = \rho gh = 0.00196 \text{ MPa}$ ，就是排出管中空气的绝对压力与当地大气压力之差。如用气压计测出当地大气压力 $p_b = 0.10132 \text{ MPa}$ ，则其绝对压力

$$p = p_g + p_b = 0.00196 + 0.10132 = 0.10328 \text{ MPa}$$

对于绝对压力低于当地大气压力的系统，其表压力将为负值。工程上用“真空度”来表示这种表压力的绝对值，以符号 p_v 表示。可见真空度 p_v 是当地大气压力与绝对压力的差值，即

$$p_v = p_b - p \quad (2-2)$$

例如，在图 2-8 的吸入管上，用 U 形管真空计测得的吸入真空度 $p_v = \rho gh = 0.00098 \text{ MPa}$ ，就是吸入管中空气的绝对压力比当地大气压力低的数值，其绝对压力

$$p = p_b - p_v = 0.10132 - 0.00098 = 0.10034 \text{ MPa}$$

表压力和真空度是以当地大气压力为基准的相对压力，前者表示比大气压力高出的压力值，后者表示比大气压力低的压力值，如图 2-9。由于当地大气压力是会变化的，作为系