

普通高等教育“十二五”规划教材

热工基础 及流体力学

主 编 卢改林

副主编 高红斌 马小霞



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

热工基础及流体力学

主 编 卢改林

副主编 高红斌 马小霞



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分三篇,由工程热力学、流体力学和传热学三部分内容组成。工程热力学部分主要讲述:热力学基本概念和基本定律,常用工质的热物理性质及基本热力过程,气体和蒸汽的流动,典型蒸汽动力循环和制冷循环分析计算;流体力学部分主要讲述:流体的基本物理性质,流体静力学,流体动力学基础,黏性流体的有压流动特点及能量损失计算;传热学部分主要讲述:导热及对流传热和辐射传热的基本规律和计算方法,传热过程的分析计算方法及优化控制措施,换热器的类型和传热计算方法。各章附有切合实际的典型例题、思考题和习题,附录给出了习题答案。

本书的知识内容是综合性热工技术理论基础,可作为热工控制及自动化、供热工程、环境工程、热工测量仪表、热能或制冷工程及相关专业的教材或教学参考书,也可作为能源动力类专业培训教材,或供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础及流体力学 / 卢改林主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012.5
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-9C24-5

I. ①热… II. ①卢… III. ①热工学—高等学校—教材②流体力学—高等学校—教材 IV. ①TK122②035

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第101906号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 热工基础及流体力学
作 者	主编 卢改林 副主编 高红斌 马小霞
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.25印张 433千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

“热工基础及流体力学”是一门综合性的专业技术基础课。本书为适应应用型高端优秀人才培养的要求，秉承先进的教育理念，重视对工科类人才基础知识、基本能力和综合素质的培养，力求以基础的理论知识联系生活和工程实践，培养学生应用多种知识和技能解决实际问题的能力，引导学生与时俱进走向学科发展和应用的前沿。

本书在结构上分为相对独立的工程热力学篇、流体力学篇和传热学篇。在内容的选取方面注重了两方面的结合：理论知识必需够用的原则与人才可持续发展能力培养的结合；基本理论、基本方法与技术应用能力培养的结合。所有术语、符号和计量单位均采用最新规定，内容言简意赅、实用性突出，各章选编了密切联系工程实际的例题、思考题和习题，附录给出了习题答案和解题思路，便于教学和学生自学。

本书工程热力学部分由太原电力高等专科学校马小霞编写；流体力学部分第七章由太原理工大学董志国编写；第八章~第十章由太原电力高等专科学校高红斌编写；传热学部分第十一章、第十二章、第十四章、第十五章由太原电力高等专科学校卢改林编写，第十三章由太原电力高等专科学校闫江涛编写。全书由卢改林担任主编，高红斌、马小霞担任副主编。

本书在编写过程中参阅了许多已经出版的经典教材，得到了许多老师、专家和出版社工作人员等的帮助，在此谨向所有支持和帮助的人致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中不足之处敬请读者给予批评指正。

编者

2012年2月

前言

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念	2
第一节 热力系统.....	2
第二节 状态和基本状态参数.....	3
第三节 状态方程及参数坐标图.....	5
第四节 热力过程、准平衡过程和可逆过程.....	6
第五节 功和热量.....	6
第六节 循环.....	8
思考题	10
习题	10
第二章 热力学基本定律	11
第一节 热力学第一定律	11
第二节 热力学第二定律	17
思考题	19
习题	20
第三章 几种工质	22
第一节 理想气体	22
第二节 水蒸气	26
第三节 混合气体	31
思考题	37
习题	38
第四章 理想气体热力过程	40
第一节 分析热力过程的目标和一般方法	40
第二节 理想气体典型热力过程	41
思考题	46
习题	46

第五章 气体和蒸汽的流动	48
第一节 稳定流动基本方程	48
第二节 喷管和扩压管中的流动特性	49
第三节 喷管的计算	50
第四节 绝热节流	53
思考题	54
习题	54
第六章 蒸汽动力循环和制冷循环	56
第一节 蒸汽动力循环	56
第二节 制冷循环	62
思考题	67
习题	67

第二篇 流体力学

第七章 流体及其物理性质	70
第一节 流体的定义和连续介质模型	70
第二节 流体的主要物理性质	71
第三节 作用在流体上的力	79
思考题	80
习题	80
第八章 流体静力学	82
第一节 流体的平衡方程式	82
第二节 重力作用下的流体平衡	85
第三节 液柱式测压计	87
第四节 平面上和曲面上的流体压力	92
思考题	96
习题	97
第九章 流体动力学基础	100
第一节 描述流体运动的几个基本概念	100
第二节 连续性方程	104
第三节 理想流体的伯努利方程	105
第四节 定常流动的动量方程	109
思考题	112
习题	112
第十章 黏性流体的管内流动	115
第一节 黏性流体的伯努利方程	115

第二节	管内流动的能量损失	117
第三节	黏性流体的两种流动状态	119
第四节	圆管层流和紊流的流动规律	121
第五节	管内流动的阻力系数	127
第六节	管道水力计算	131
第七节	水击现象	134
思考题		136
习题		136

第三篇 传 热 学

第十一章	热量传递基本方式概述	140
第一节	热量传递的三种基本方式	140
第二节	传热过程和热阻	143
思考题		145
习题		146
第十二章	导热	147
第一节	导热理论基础	147
第二节	稳态导热	154
第三节	非稳态导热	163
思考题		169
习题		169
第十三章	对流传热	172
第一节	对流传热概述	172
第二节	相似原理在对流传热中的应用	174
第三节	单相流体对流传热	178
第四节	相变对流传热	185
思考题		192
习题		192
第十四章	辐射传热	195
第一节	热辐射的基本概念	195
第二节	黑体辐射的基本定律	198
第三节	实际物体的辐射特性	201
第四节	封闭系统内表面间的辐射传热	204
第五节	气体辐射简介	215
思考题		217
习题		217

第十五章 传热过程与换热器	219
第一节 传热过程分析及传热系数.....	219
第二节 换热器概述及平均传热温差.....	225
第三节 换热器的传热计算.....	232
第四节 传热的强化与削弱简介.....	235
思考题.....	238
习题.....	238
附录	240
附表 1 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按温度排列)	240
附表 2 饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按压力排列)	241
附表 3 未饱和水与过热蒸汽的热力性质表	243
附表 4 几种材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率	249
附表 5 几种保温和耐火材料的导热系数与温度的关系	250
附表 6 气体的热物理性质	250
附表 7 在大气压力 ($p=1.01325\times 10^5\text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	251
附表 8 油类的热物理性质	251
附表 9 饱和水的热物理性质	252
附表 10 干饱和水蒸气的热物理性质	253
附表 11 大气压力 ($p=1.01325\times 10^5\text{Pa}$) 下过热水蒸气的物性参数	254
附表 12 几种饱和液体的热物理性质	254
附图 1 水蒸气焓~熵图	256
附图 2 湿空气焓湿图	257
附图 3 氨 (NH_3 , R717) 的 $\lg p\sim h$ 图	258
附图 4 氟利昂-134a ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$, R134a) 的 $\lg p\sim h$ 图	259
附图 5 氟利昂-22 (CHCl_2F_2 , R22) 的 $\lg p\sim h$ 图	260
习题解答	261
参考文献	283

第一篇 工程热力学

当人类面对科学技术和生产力的迅猛发展并享受着由此带来的丰富的物质文明和精神文明的时候，可曾知道这一切的物质基础是能源。自然界中可大量产生动力的主要能源有风能、水能、太阳能、燃料化学能、原子能等。在这些能源中除了风能和水能可以向人们直接提供机械能外，其他的各种能源只能直接地或间接地（燃烧和核反应）提供热能。热能的利用可分为两种基本方式：一种是热能的直接利用，即将热能直接用于加热，如采暖、冶炼、蒸发和烘干等；另一种是热能的间接利用，即将热能转化为其他形式的能量，如锅炉产生的高温高压蒸汽所携带的热能，通过汽轮机转换为机械能，而后带动发电机输出电能。但是在能量转换的过程中，总有一些损失，致使转换效率不高。为了合理有效地实现热能与其他形式能量之间的转换并提高转换效率，就必须对工程热力学内容进行深入细致的研究。

工程热力学是从工程的观点出发研究热能和机械能之间相互转化规律的学科，它从理论上阐明了提高能量转换效率的途径和方法。

热能转换成机械能必须借助一套设备和某种载能物质。这个设备就是通常所说的热机，而载能物质便是工质。工质必须具备良好的流动性和膨胀性，例如蒸汽动力装置的工质是水蒸气，本课程选用气（汽）态物质作为工质，除水蒸气外还有理想气体、湿空气、制冷剂等。

在研究工程热力学时，首先建立一些基本概念，然后着重阐述热力学第一定律和热力学第二定律，根据热力学两个基本定律结合工质的性质，分析各种热力过程中工质状态的变化和能量转换规律，分析热力循环的（蒸汽动力循环和制冷循环）的经济性，指出提高热效率的途径。

第一章 基本概念

本章介绍研究热能和机械能相互转换规律所需的基本概念和术语，它是后续内容的基础。

第一节 热力系统

根据研究工作的需要，人为划定的热力学研究对象称为热力系统，简称“系统”或“热力系”，如图 1-1 所示。热力系以外的物质称为外界。热力系与外界的分界面称为边界。系统的边界可以是真实的 [如图 1-1 (a) 中气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的边界]，也可以是假想的 [如图 1-1 (b) 中进口截面和出口截面是假想的边界]；可以是固定不变的 [图 1-1 (b)]，也可以是变动的 [图 1-1 (a) 中活塞移动时边界发生变化]。

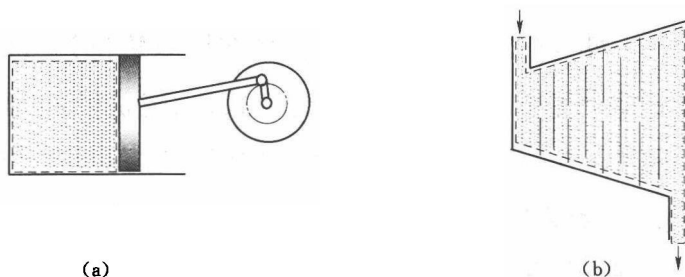


图 1-1 热力系统

一般说来，系统和外界之间总会有相互作用关系。此作用关系有能量交换和物质交换，能量交换又有热量交换和功量交换。按系统与外界之间的作用情况可把热力系统分为：

(1) 闭口系统和开口系统。与外界没有任何物质交换的热力系统称为闭口系统，简称“闭口系”，如图 1-1 (a) 所示。与外界有物质交换的热力系统称为开口系统，简称“开口系”，如图 1-1 (b) 所示。

(2) 绝热系统和非绝热系统。与外界无热量交换的热力系统称为绝热系统，简称“绝热系”；否则称为非绝热系统或非绝热系。

(3) 孤立系统和非孤立系统。与外界既无物质交换又无能量交换（包括热量交换和功量交换）的热力系统称为孤立系统，简称“孤立系”；否则称为非孤立系统或非孤立系。

另外，还有一些特殊的系统：具有无限大热容量的系统，它们在放出和吸收有限热量时不改变系统自身的温度，称之为热源，如高温热源和低温热源；热功转换是通过工质膨

胀实现的系统称为简单可压缩系统。

第二节 状态和基本状态参数

一、状态和平衡状态

热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为状态。平衡状态是指在不受外界影响的条件下,系统的宏观性质不随时间改变的状态。不受外界影响是指对系统不做功也不传热。系统的平衡包括系统各部分之间没有热量传递的热平衡,没有相对位移的力平衡,如有化学反应的系统还应考虑化学平衡。也就是说实现平衡状态的条件是:系统内部以及与外界之间同时满足各类平衡或者说各种不平衡势差全部消失。平衡状态是热力学的一个重要概念,本教材仅讨论平衡状态。

二、状态参数

描述热力系统所处状态的宏观物理量称为状态参数。状态参数的特征如下:

(1) 状态参数是状态的单值函数,状态一旦确定,状态参数就是唯一确定的,状态参数不变状态也是唯一确定的。

(2) 状态参数的变化只与工质的初终状态有关,而与状态变化的途径无关,可以表示为

$$\Delta x = \int_1^2 dx = x_2 - x_1$$
$$\oint dx = 0$$

式中 x ——工质的某一状态参数。

热力学中常用的状态参数有比体积、压力、温度、热力学能、焓、熵等。其中比体积(v)、压力(p)、温度(T)称为基本状态参数。

三、基本状态参数

(一) 比体积(v)和密度(ρ)

比体积是指单位质量工质所占有的体积,单位是 m^3/kg ,也可称为比容。如质量为 m 的气体,占有的体积为 V ,则比体积为

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

密度是指单位体积内所含工质的质量,单位是 kg/m^3 。若体积为 V 的气体,具有的质量为 m ,则密度为

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

显然,比体积 v 与密度 ρ 之间互为倒数,即 $v\rho=1$,两者不是独立参数,都是用来描述工质聚集的疏密程度。

(二) 压力(p)

单位面积上所承受的垂直作用力称作压力(即压强)。按分子运动学说,气体的压力

是气体的大量分子向容器壁面撞击所产生的平均结果。压力的国际单位是帕（帕斯卡），符号为 Pa， $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上常见的压力单位还有：兆帕（MPa）；千帕（kPa）；巴（bar）；标准大气压（atm）（又称物理大气压）；工程大气压（at）（简称大气压）；毫米水柱（mmH₂O）；毫米汞柱（mmHg）。其中 $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ ； $1\text{kPa}=10^3\text{Pa}$ ； $1\text{bar}=10^5\text{Pa}$ 。

各种压力单位之间的换算关系见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算

单位	Pa (帕)	atm (标准大气压)	at (工程大气压)	mmHg (毫米汞柱)	mmH ₂ O (毫米水柱)
Pa	1	9.86923×10^{-6}	1.01972×10^{-5}	7.50062×10^{-3}	1.01972×10^{-1}
atm	1.01325×10^5	1	1.03323	760	1.03323×10^4
at	9.80445×10^4	9.67841×10^{-1}	1	735.559	1×10^4
mmHg	133.322	1.31579×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1	13.5951
mmH ₂ O	9.80665	9.67841×10^{-5}	1×10^{-4}	735.559×10^{-4}	1

压力通常用压力计测量。而压力计本身处于大气压力 p_a 作用下，受其影响，其测量值是一相对压力。而容器内工质的实际压力称为绝对压力，用符号 p 表示。如图 1-2 所示，当 $p > p_a$ 时，压力计的测量值称为表压力，用符号 p_e 表示，则

$$p_e = p - p_a \quad (1-1)$$

当 $p < p_a$ 时，压力计的测量值称为真空度，用符号 p_v 表示，则

$$p_v = p_a - p \quad (1-2)$$

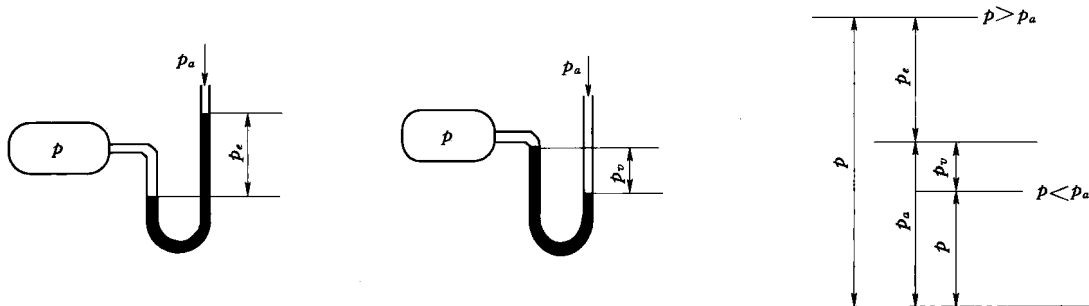


图 1-2 各种压力关系图

表压力 p_e 和真空度 p_v 不仅与工质的状态有关，还与大气压力 p_a 有关，即使工质的状态不变，大气压力 p_a 发生变化时，它们也要变化。因此，它们不是状态参数。只有绝对压力才是系统所处状态的单值函数，才是状态参数。在后续内容中所讲的压力，未作特别说明的均指绝对压力。

【例 1-1】 某容器的压力表读数为 1MPa，当时当地大气压力为 101325Pa。当容器内气体状态未变，而当时当地大气压力变为 200000Pa。问：此时压力表的读数为多少？容器内气体的绝对压力为多少？

解 压力表读数为表压力。

瓶内氧气的绝对压力为

$$p = p'_e + p'_a = 1101325 \text{ (Pa)}$$

最终

$$p''_e = p - p''_a = 901325 \text{ (Pa)}$$

此例题说明：即使绝对压力不变，压力表的读数也随当时当地环境压力发生改变。

(三) 温度 (T)

温度是物体冷热程度的标志。根据分子运动学说，温度是物体分子热运动激烈程度的标志。当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计指示的温度就是被测物体的温度。

衡量温度的标尺称为温标。热力学温标是目前国际规定的基本温标，用这种温标确定的温度称为热力学温度，以符号 T 表示，单位为开尔文，简称“开”，以符号 K 表示。与热力学温标并用的还有摄氏温标，用这种温标确定的温度称为摄氏温度，以符号 t 表示，单位为摄氏度，以符号 $^{\circ}C$ 表示。摄氏温度和热力学温度之间的关系为

$$t(^{\circ}C) = T(K) - 273.15 \quad (1-3)$$

第三节 状态方程及参数坐标图

一、状态方程式

热力学中的平衡状态可以用状态参数来描述。对于简单可压缩系统，只需两个彼此独立的参数，便可确定系统的平衡状态，如下式

$$v = v(p, T); \quad p = p(T, v); \quad T = T(p, v); \quad F(p, v, T) = 0 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 建立了基本状态参数之间的关系，称为状态方程式。

二、参数坐标图

由两个彼此独立的状态参数为横、纵坐标所构成的平面坐标图称为参数坐标图。常用的参数坐标图有压容图 ($p \sim v$ 图) 和温熵图 ($T \sim s$ 图) 等。例如， $p \sim v$ 图 [图 1-3 (a)] 上，点 1 描述的是由状态参数 p_1 、 v_1 所确定的平衡状态。该状态一经确定，则对应于该状态下的 T_1 、 s_1 也就有确定的值，对应于 $T \sim s$ 图 [图 1-3 (b)] 上，存在一个唯一的点 1。在这里应注意只有平衡状态才能在参数坐标图中表示，非平衡状态不能在参数坐标图中表示。

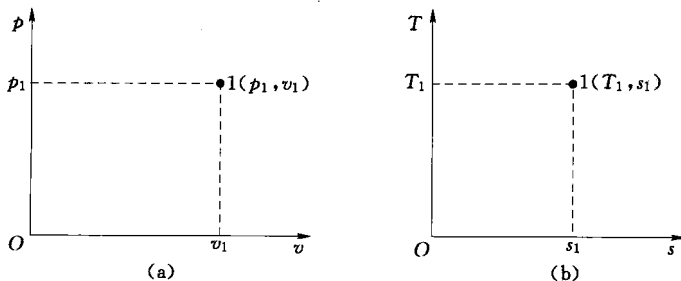


图 1-3 状态参数坐标图

(a) $p \sim v$ 图; (b) $T \sim s$ 图

第四节 热力过程、准平衡过程和可逆过程

一、热力过程

热能与机械能的相互转换或热能的转移必须通过热力系统的状态变化来实现。热力系统由一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和称为热力过程，简称过程。

二、准平衡过程

实际热力过程打破了工质的平衡状态，促使工质向新的状态变化，故实际过程是不平衡的，热力学对其不好描述。为简化起见，过程中热力系统所经历的每一个状态都无限地接近平衡状态的热力过程称为准平衡过程（或准静态过程）。否则，称为非平衡过程（或非准静态过程）。准平衡过程的每一个状态都可以当做平衡状态处理，可以用确定的状态参数描述，可以在参数坐标图上用一条连续的曲线表示。而非平衡过程却不行。

怎样才能实现准平衡过程呢？其应满足的条件是：推动过程进行的势差为无限小。势差为无限小即要求外界对热力系统的作用必须缓慢到足以使热力系统内部能及时恢复不断被破坏的平衡。例如，在 2000r/min 的活塞式压气机中，活塞运动的速度（过程进行的速度）一般在 10m/s 以内，但气体的内部压力波的传播速度（恢复平衡的速度）通常每秒数百米，所以活塞式压气机进行的热力过程可以当做准平衡过程。

三、可逆过程

准平衡过程仅是简化了热力过程中热力系统内部状态的描述，对于热力系统与外界间的能量交换并未专门考虑。例如，活塞气缸内的气体对外膨胀做功的热力过程，由于存在摩擦，气体所做的功与外界获得的功量数量不同。仅系统与外界交换的功量数量这一问题，用准平衡过程来描述就非常繁杂。为了简化热力过程中热力系统与外界间的能量交换情况的描述，热力学建立了可逆过程的概念。

热力系统经历一个过程之后，如果能使热力系统与外界同时恢复到初始状态而不留下任何痕迹，则称这一过程为可逆过程。否则就是不可逆过程。可逆过程的定义仅要求过程结束后，具备热力系统与外界同时恢复到初始状态的可能性，并不要求必须回到初态。实现可逆过程的充要条件是：推动过程进行的势差为无限小，而且不存在任何耗散效应。对比实现可逆过程与准平衡过程的充要条件可知：可逆过程就是无耗散效应的准平衡过程，可逆过程与准平衡过程的差异在于有无耗散效应。可逆过程必然是准平衡过程，但准平衡过程却不一定是可逆过程。

第五节 功 和 热 量

一、可逆过程的体积变化功

工程热力学中，热能转换为机械能是通过工质的体积膨胀实现的。系统体积变化时通过边界与外界交换的功称为体积变化功，用符号 W 表示，单位为 J 或 kJ。单位质量工质所作的体积变化功，称为比功，用符号 w 表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg。工程热力学规定：

热力系统对外界做功，功量为正；外界对热力系统做功，功量为负。

如图 1-4 (a) 所示，假定气缸中盛有质量为 m 的工质，经历了一个可逆膨胀做功过程。若活塞在工质压力 p 的推动下向前移动了一微小距离 dx 。活塞面积为 A ，则工质作用于活塞上的力为 pA （非平衡过程不能用系统的状态参数确定此力）。于是工质在这一可逆微元过程与外界交换的功（存在耗散效应的准平衡过程，此功仅是工质所做的功）为

$$dW = pAdx = p dV$$

式中 dV ——活塞移动距离 dx 时气缸中工质体积的增量， $dV = Adx$ 。

在工质由状态 1 可逆膨胀到状态 2 的过程中，工质与外界交换的体积变化功为

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-5)$$

单位质量工质所交换的体积变化功为

$$dw = \frac{dW}{m} = p dv \quad (1-6)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-7)$$

上述关于功量的计算式仅适用于可逆过程。可以看出，功量是过程量，即功量数值的大小不仅取决于系统的初、终状态，而且与过程的途径有关。如图 1-4 (b) 所示，尽管初态都是 1 状态，终态都是 2 状态，当经历过程途径 1— a —2 时，过程线与横坐标包围的面积（过程 1— a —2 线下的面积）则为系统与外界交换的比功。当经历过程途径 1— b —2 时，过程线下的面积（过程 1— b —2 线下的面积）变化，所交换的比功也就不同。因此， $p \sim v$ 图也可以称为示功图。

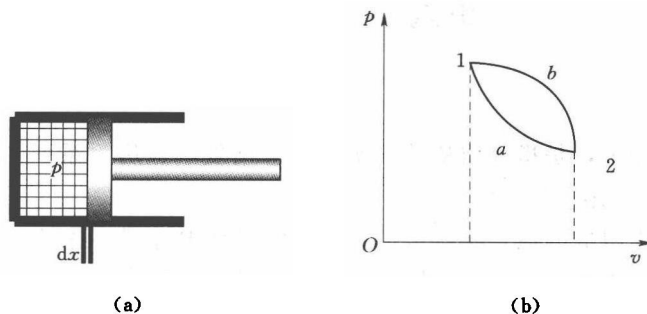


图 1-4 活塞气缸及 $p \sim v$ 图

(a) 活塞气缸；(b) $p \sim v$ 图

根据比体积的变化，可以判断可逆过程系统与外界之间功量交换的方向：若比体积增大 $dv > 0$ ，则 $dw > 0$ ，系统对外做功，即膨胀功；若比体积减小 $dv < 0$ ，则 $dw < 0$ ，外界对系统做功，即压缩功。

二、可逆过程的热量

热力系统与外界之间依靠温差传递的能量称为热量，用符号 Q 表示，单位与功的单位相同，为 J 或 kJ。单位质量工质所传递的热量，称为比热量，用 q 表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg。工程热力学中规定：系统吸收热量，热量为正，系统放出热量，热量为负。

热量也是过程量，即热量数值的大小也与过程的途径有关。在可逆过程中，与功量计算式相对应的热量计算公式为

$$dq = Tds \quad (1-8)$$

$$dQ = TdS \quad (1-9)$$

$$q = \int_1^2 Tds \quad (1-10)$$

$$Q = \int_1^2 TdS \quad (1-11)$$

以上热量计算公式中， S 为状态参数熵，单位是 J/K 或 kJ/K 。 s 为单位质量工质的熵，称为比熵，单位为 $J/(kg \cdot K)$ 或 $kJ/(kg \cdot K)$ 。因此，对于可逆过程熵的定义式为

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

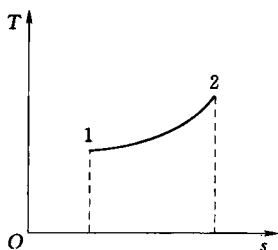


图 1-5 $T \sim s$ 图

熵是可逆过程热量传递的标志性参数。根据熵的变化，可以判断可逆过程系统与外界之间热量交换的方向：若熵增大 $ds > 0$ ，则 $dq > 0$ ，系统吸热；若熵减小 $ds < 0$ ，则 $dq < 0$ ，系统放热。可逆过程中单位质量工质与外界所交换的热量可以用 $T \sim s$ 图中过程曲线下的面积来表示，如图 1-5 所示，所以 $T \sim s$ 图又称为示热图。上述关于热量的计算式仅适用于可逆过程，所以用熵的变化判断热量交换的方向也仅适用于可逆过程。

第六节 循 环

一、热力循环

热力循环简称循环，是指工质从某一初始状态出发，经历一系列热力状态变化之后，又回到初始状态的封闭热力过程。

全部由可逆过程组成的循环叫做可逆循环，若循环中有部分过程和全部过程是不可逆循环，则该循环就是不可逆循环。按照循环作用效果的不同，可将循环分为正向循环和逆向循环。正向循环又称动力循环或热机循环，是将热能转换为机械能的循环。逆向循环是消耗机械能，将热量从低温热源传递给高温热源。

二、正向循环和逆向循环

系统完成一个循环后，对外界净做出的功量（系统沿循环各过程所做功的代数和）称为循环净功，用符号 w_0 表示。如图 1-6 (a) 所示，正向循环从高温热源取热 q_1 ，将其一部分转变为功 w_0 ，一部分排给低温热源剩余的热 q_2 。如图 1-7 (a) 所示，逆向循环消耗外功 w_0 ，从低温热源取热 q_2 ，二者一并向高温热源放热 q_1 。按照实施循环的目的不同，逆向循环又分为制冷循环和热泵循环。制冷循环的目的在于将热量 q_2 从低温热源（被冷却物体、冷库）取出，向作为高温热源的环境散热，以维持低温热源的低温；热泵循环的目的则是从环境吸热，向高温热源（被加热物体）提供热量 q_1 ，以维持高温热源

的高温。由此可知，制冷循环和热泵循环工作温度区域也不同，制冷循环工作在环境和被冷却物体之间，热泵循环工作于被加热物体和环境之间。

如图 1-6 (b) 所示，可逆的正向循环在参数坐标图中是按顺时针方向进行的循环，膨胀过程 1—2—3 所作的膨胀功（1—2—3 线下的面积）要大于压缩过程 3—4—1 所消耗的压缩功（3—4—1 线下的面积）。循环完成后，系统对外界作出的循环净功 w_0 为膨胀功和压缩功的差值，即 $p \sim v$ 图上循环曲线所包围的面积 1—2—3—4—1。

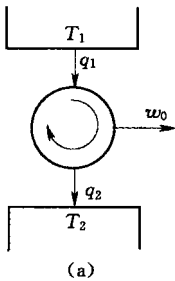


图 1-6 正向循环

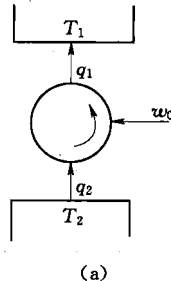
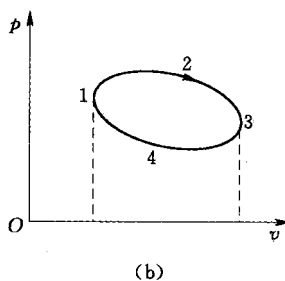
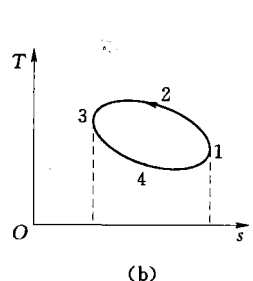


图 1-7 逆向循环



如图 1-7 (b) 所示，可逆的逆向循环在参数坐标图中是按逆时针方向进行的循环。放热过程 1—2—3 所放出的热 q_1 （1—2—3 线下的面积）要大于吸热过程 3—4—1 所吸收的热 q_2 （3—4—1 线下的面积）。这是由于外界提供的功量 w_0 也转变为热，与吸热过程所吸收的热 q_2 一并在放热过程排给高温热源所导致的必然结果，外界提供的功量 w_0 就是 $p \sim v$ 图上循环曲线所包围的面积 1—2—3—4—1。

三、循环的经济指标

循环的经济指标用工作系数来衡量，即

$$\text{工作系数} = \frac{\text{得到的效益}}{\text{付出的代价}}$$

动力循环的经济指标用循环热效率 η_t 来衡量。动力循环的效益是循环净功 w_0 ，付出的代价是从高温热源获取的热量 q_1 ，所以循环热效率为

$$\eta_t = \frac{w_0}{q_1} \quad (1-12)$$

显然 η_t 愈大，热功转换效果愈好。

制冷循环的经济指标用制冷系数 ϵ_1 来衡量。制冷循环的效益是从低温热源取出热量 q_2 ，付出的代价是为了提供热量耗费功量 w_0 ，所以制冷系数为

$$\epsilon_1 = \frac{q_2}{w_0} \quad (1-13)$$

热泵循环的经济指标用供热系数 ϵ_2 来衡量。热泵循环的效益是向高温热源提供热量 q_1 ，付出的代价是为了提供 q_1 耗费功量 w_0 ，所以供热系数为

$$\epsilon_2 = \frac{q_1}{w_0} \quad (1-14)$$

制冷系数 ϵ_1 和供热系数 ϵ_2 愈高，制冷和供热的经济性愈好。