

普通高等教育“十二五”规划教材

热工基础与 发动机原理

刘永峰 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

热工基础与发动机原理

主 编 刘永峰
副主编 王 军 朱爱华
参 编 刘志军 田洪森
主 审 裴普成

机械工业出版社

前 言

如果说世界上的万事万物都有产生、发展、灭亡的历史，发动机无疑也遵循其规律；如果没有一代又一代的发动机研究者孜孜不倦的研究，发动机也不会有如此广泛的应用；如果没有1952年美国洛杉矶光化学烟雾事件，人们也不会对汽车尾气加以重视。今天，一方面是汽车工业作为国民经济的支柱产业在日新月异的发展，另一方面是人们日益增长的环保要求，从而对传统发动机提出了更高的要求，以至于有些学者全身心地研究新能源发动机，如纯电动汽车、燃料电池汽车、混合动力汽车等。但是，传统的发动机在没有完全退出历史舞台的时候，我们还有必要对其进行深入研究，不断提高其性能仍然是目前迫切而且有意义的工作。

据不完全统计，全国目前有汽车相关专业的高等院校有上百所，其中有“985”以及“211”院校，也有普通应用型大学，还有高等职业技术学院，出版的发动机原理相关教材中有一些经典之作。但是，这些教材要么是适应研究型大学的，其理论推导过于繁琐，侧重培养研究型人才；要么就是适应高等职业技术学院，侧重培养一线的维修技术人才。相对缺乏适合应用型大学培养应用型高级人才的教材，且章节、层次和内容安排不太符合应用型大学的教学大纲，因此，应出版一本适合应用型大学培养模式且符合“卓越工程师”要求的发动机原理教材。发动机原理是汽车专业必修的课程，在专业学习中占有很重要的位置，热工基础知识是发动机原理的先修课程，但现今根据教育部的课时缩减安排，使得一些院校无法单独设置热工基础课程，只能在讲授发动机原理之前，补充一些必需的热工基础知识，其学时约占该课程的1/6，由于没有合适的教材给学生的学习带来了不便。为此，我们编写了这本将热工基础知识与发动机原理知识这两部分内容合二为一的教材，以满足本专业学生学习这两部分内容的需要。编写时融入了发动机新技术内容，如汽油机缸内直喷技术、柴油机电控高压共轨技术等。本书内容包括热工基础、发动机工作指标和工作循环、发动机换气过程、发动机燃料供给与调节、汽油机混合气形成及燃烧过程、柴油机混合气形成及燃烧过程、发动机污染物生成机理与控制方法、发动机的特性。

本书由北京建筑工程学院刘永峰担任主编，并编写第2章2.2，第5、8章；装甲兵工程学院王军编写第3、4、6章；北京建筑工程学院朱爱华编写第1章；北京建筑工程学院田洪森编写第7章；忻州师范学院刘志军编写第2章2.1。本书在编写和出版过程中，得到了清华大学汽车工程系博士研究生导师帅石金教授、马凡华教授，以及北京航空航天大学博士研究生导师李兴虎教授的多次指导，重庆交通大学硕士研究生导师何义团副教授给予许多建设性意见；在修改、图片整理和校对过程中得到了北京建筑工程学院硕士研究生弋理的大力支持和帮助；同时本书被北京建筑工程学院教务处作为教材重点项目进行资助，在此深表谢意。

本书由清华大学汽车工程系博士研究生导师裴普成教授担任主审，裴普成教授在百忙之中多次审阅书稿，提出了许多宝贵意见，编者深表感谢。

由于本书内容涉及面广，加之编者水平有限和时间仓促，书中错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者和专家批评指正。

编者
于北京

目 录

前言

第1章 热工基础	1
1.1 引言	1
1.2 基本概念	2
1.3 热力学第一定律	12
1.4 理想气体的热力性质	21
1.5 理想气体的基本热力过程	37
1.6 热力学第二定律	50
本章小结	60
习题与思考题	63
第2章 发动机工作指标和工作循环	66
2.1 发动机的工作指标	66
2.2 发动机的工作循环	72
本章小结	78
习题与思考题	78
第3章 发动机换气过程	79
3.1 发动机换气过程	79
3.2 换气过程空气运动	87
3.3 换气过程性能指标及其影响因素	92
3.4 可变配气正时	96
3.5 增压发动机换气过程特征	100
3.6 废气再循环对换气过程的影响	103
本章小结	107
习题与思考题	107
第4章 发动机燃料供给与调节	108
4.1 柴油机燃油供给	108
4.2 柴油机燃油喷射	115
4.3 柴油机燃油喷射调节	122
4.4 高压共轨电控喷油系统	129
4.5 汽油机燃油供给	133
4.6 汽油机燃油喷射	135
本章小结	141
习题与思考题	142

第5章 汽油机混合气形成及燃烧

过程	143
5.1 汽油机混合气形成	143
5.2 汽油机的燃烧	145
5.3 汽油机的燃烧室	152
本章小结	158
习题与思考题	158

第6章 柴油机混合气形成及燃烧

过程	160
6.1 柴油机混合气形成及燃烧室	160
6.2 柴油机燃烧过程	173
6.3 柴油机燃烧过程改进技术	182
本章小结	189
习题与思考题	190

第7章 发动机污染物的生成机理与

控制方法	191
7.1 汽油机污染物的生成机理	191
7.2 汽油机污染物的控制方法	195
7.3 柴油机污染物的生成机理	205
7.4 柴油机污染物的控制方法	207
本章小结	215
习题与思考题	215

第8章 发动机的特性

8.1 发动机工况及基本特性	216
8.2 发动机的负荷特性	217
8.3 发动机的速度特性	218
8.4 发动机的万有特性	219
8.5 发动机试验	220
本章小结	224
习题与思考题	224

参考文献

参考文献	225
------------	-----

第1章 热工基础

学习目标:

- 1) 理解热能转换所涉及的基本概念和术语。
- 2) 学会可逆过程的体积变化功和热量的计算。
- 3) 深入理解热力学第一定律的实质, 熟练掌握闭口系统和稳定流动系统的能量方程, 以解决工程实际问题。
- 4) 掌握理想气体的状态方程及理想气体的比热容, 能正确运用比热容计算理想气体的热力学能、焓和熵。
- 5) 掌握理想气体各种热力过程, 能计算分析各种热力过程的功量和热量, 并利用 $p-v$ 图和 $T-s$ 图对热力过程进行定性分析。
- 6) 深刻理解热力学第二定律的实质, 掌握卡诺循环、卡诺定理及其意义。
- 7) 掌握熵参数和克劳修斯不等式意义。

重点:

- 1) 理解准平衡过程、可逆过程的含义, 理解功量、热量、正向循环及逆向循环的含义。
- 2) 理解热力学第一定律的实质, 理解热力学能、焓、推动功、流动功、技术功的含义。掌握闭口系统能量方程、稳定流动能量方程。
- 3) 掌握理想气体状态方程, 理想气体的比热容、热力学能、焓和熵等概念及计算分析。
- 4) 掌握理想气体的热力过程, 包括定容过程、定压过程、定温过程、绝热过程, 以及各过程的方程式、基本状态参数间关系、过程曲线在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上的表示、功量和热量分析。
- 5) 理解热力学第二定律的实质和表述, 掌握卡诺循环和卡诺定理。

难点:

学会判断过程是否可逆, 学会应用稳定流动能量方程分析典型热工设备, 理想气体的多变过程分析, 熵的导出和克劳修斯不等式。

1.1 引言

1. 为什么要学习热工基础

发动机是通过燃料燃烧释放出的热能转换成机械能来提供动力的, 因此, 研究发动机原理, 必然研究燃料在发动机内是如何燃烧的, 其热效率受哪些因素影响, 释放的热能与机械能的转换遵循的规律, 其转换效率与什么因素有关, 热量是如何传递的, 这些都涉及热工基础知识。

2. 热工基础的内容

热能的利用可分为直接利用和间接利用。

热能的直接利用是指直接利用热能加热物体，热能的形式不发生变化，如用于发动机进气加热，热能的直接利用属于传热学，包括三种传热方式，即热传导、对流换热、辐射换热。热能的间接利用是指热能转换为机械能（或进一步转换为其他形式的能量），热能和机械能之间的转换属于工程热力学的范畴。热能和机械能之间的转换必须遵守热力学第一定律、热力学第二定律。人们可以通过选择能量转换所凭借的物质——工质，以及合理安排热力过程来提高能量间接利用的经济性。所以，热力学的两大基本定律、工质的热力性质和热力过程，一起构成了工程热力学的基础。

运用热工基础的相关理论，对发动机的实际热力过程和热力循环进行分析，提出提高能量利用经济性的具体途径和措施，是研究热能和机械能转换的一个重要目的和内容。

3. 热工基础的研究方法

传热学研究的基础是实验总结出的基本定律，研究方法主要有解析法、数值计算法和实验研究法。热力学有微观和宏观两种不同的研究方法。微观研究方法的热力学称为微观热力学，能够解释热现象的本质及其内在原因，可以预想、推断和解释物质的宏观属性。宏观研究方法的热力学称为经典热力学，它把物质看成连续的整体，采用一些宏观物理量来描述物质所处的状况，并通过实验找出所研究现象中一些可测定物理量的变化关系。

在研究热能转换为机械能以及系统的各参数之间的关系，宏观研究方法的知识就足够了，本章主要讨论宏观热力学，主要内容包括热力学的两大基本定律，工质的热力性质和热力过程，以及这些理论在工程实际过程中的应用。

1.2 基本概念

在学习热力学两大基本定律之前，首先要掌握热能和机械能相互转换所涉及的基本概念和术语，它们是学习两大基本定律和其他后续内容的基础。

1.2.1 热力系统

1. 热力系统、外界、边界

热力学中，根据研究问题的需要，将所要研究的对象与周围环境分隔开来，这种人为划定的热力学研究对象称为热力系统，简称热力系或系统。热力系统以外的物体称为外界；热力系统与外界的分界面称为边界。边界可以是真实存在的实际界面，也可以是实际不存在的假想界面，可以是静止的固定界面，也可以是运动的胀缩界面。

如图 1-1a 所示为气缸活塞机构，若把虚线所包围的空间取作热力系统，则其边界就是真实的，其中一条边界是移动的。图 1-1b 所示的真空器，当外界连接的阀门打开时，外界空气在大气压力作用下将流入容器，直至其压力与外界大气压力平衡为止。我们可以把大气中流入容器的那部分空气用一个假想的边界从大气中划分出来，那么，容器内壁以及假想的边界所包围的空气便是人们研究的热力系统。当阀门打开后，随着空气流入容器，假想的边界受外界空气压缩，这时边界及整个系统都发生收缩。

2. 热力系统的分类

根据热力系统和外界之间能量和物质交换情况，热力系统可分为各种不同的类型。

根据热力系统与外界有无物质交换，可将热力系统分为闭口系统和开口系统。与外界无物质交换的系统称为闭口系统，简称闭口系。如图 1-1a 中气缸内气体即为闭口系统。闭口

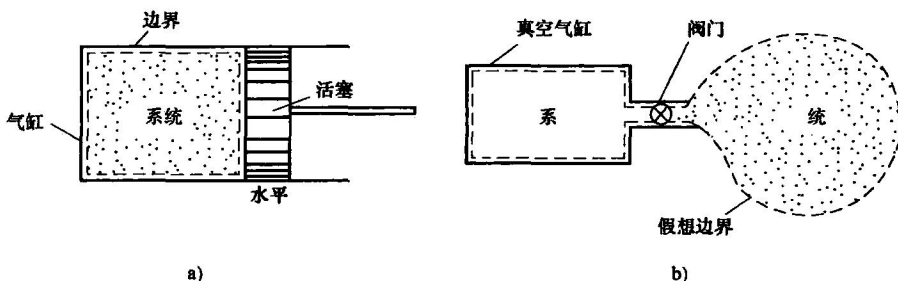


图 1-1 热力系统

a) 气缸活塞机构 b) 真空器

系统内物质的质量保持恒定不变，所以闭口系统又称为控制质量系统。与外界有物质交换的热力系统称为开口系统，简称开口系，这类热力系统的主要特点是在所分析的系统内工质是流动的。这时，可以把研究对象规划在一定空间范围内，如图 1-1b 中虚线所示，该空间范围称为控制容积系统。

根据热力系统与外界的能量交换情况，可将热力系统分为多种类型。在分界面上与外界不存在热量交换的系统称为绝热系统。在分界面上与外界既无能量交换又无物质交换的系统称为孤立系统，又称孤立系。与外界仅交换热量，且具有无穷大热容量的系统称为热源。对外放热的热源称为高温热源，又称为热源；对外吸热的热源称为低温热源，又称为冷源。

工程热力学中，最常见的热力系统由可压缩流体构成，如蒸汽动力装置中的水蒸气，内燃机气缸内的燃气等，由可压缩流体构成的热力系统称为可压缩系统。如果可压缩系统与外界只有准静态体积变化功（膨胀功或压缩功）交换，则此系统称为简单可压缩系统。工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。

除上述各类系统外，还可以把系统分为单相系、多相系、均匀系、非均匀系等。

1.2.2 工质的热力学状态及基本状态参数

1. 热力状态

所谓热力状态，是指热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状态。在内燃机中，气缸吸入燃气，通过压缩行程，气缸内气体压力、温度升高，当火花塞点火，燃气燃烧释放出大量的热，使燃气的压力、温度急剧上升，推动活塞做功，热能转换为机械能，气缸内压力和温度逐步下降。在这些过程中，工质的状态（压力、温度等）在不断变化。如改用热力学术语表示，则应说燃气的热力状态在不断变化。

热力系统可能呈现各种不同的状态，在没有外界影响的条件下（重力场除外），热力系统的宏观性质不随时间变化的状态称为平衡状态。当物体之间有温差存在而发生接触时，必然有热自发地从高温物体传向低温物体，系统状态不断变化直至温差消失而达到平衡。处于平衡态的热力系统具有均匀一致的温度、压力等参数，可以用确定的温度和压力等物理量来描述。非平衡态的热力系统的参数是不确定的。

2. 状态参数

描述系统状态的宏观物理量称为热力状态参数，简称状态参数。通常系统由工质组成，因而描述系统在某瞬间所呈现的宏观物理状况的状态参数，也就是工质的状态参数。

工程热力学中常用的状态参数有：压力（ p ）、温度（ T ）、比体积（ v ）、热力学能

(U)、焓 (H)、熵 (S)。其中压力、温度和比体积三个参数可以直接并容易用仪器测定,称为基本状态参数,其他状态参数可依据这些基本状态参数之间的关系间接地导出,称为非基本状态参数。

压力和温度这两个参数与系统质量的多少无关,称为强度量;体积、热力学能、焓和熵等与系统质量成正比,称为广延量,广延量具有可加性,在系统中它的总量等于系统内各部分同名参数值之和。单位质量的广延量参数,称为比参数,系统的广延量参数除以系统的总质量即为比参数,具有强度量的性质。比参数用小写字母表示,比如比体积 v 、比热力学能 u 、比焓 h 、比熵 s 等。

状态参数是热力状态的单值函数,即状态参数的值仅取决于给定的状态,即状态一定,描述状态的参数也就确定。状态参数具有如下数学特性:

当系统由初态 1 变化到末态 2 时,任一状态参数 Z 的变化等于初、末状态下该参数的差值,而与其中经历的路径无关。

$$\Delta Z = \int_1^2 dZ = Z_2 - Z_1 \quad (1-1)$$

当系统经历一系列状态变化而又回到初状态时,其状态参数的变化为零。

$$\oint dZ = 0 \quad (1-2)$$

反之,如果物理量具有上述数学特征,则该物理量一定是状态参数。

3. 基本状态参数

(1) 压力 单位面积上所承受的垂直作用力称为压力(即物理学中的压强)。对于容器内的气体工质来说,压力的微观解释是大量气体分子作不规则运动时对器壁频繁碰击的宏观统计结果,这种气体真实的压力又称为绝对压力,用符号 p 表示。

工程上所采用的压力表都是在特定的环境(主要是大气环境)中测量气体压力的。如常见的 U 形管压力计(图 1-2a)或弹簧管压力表(图 1-2b)等,所测出的压力值都受限于环境中的大气压力 p_b ,并不是系统内气体的绝对压力。

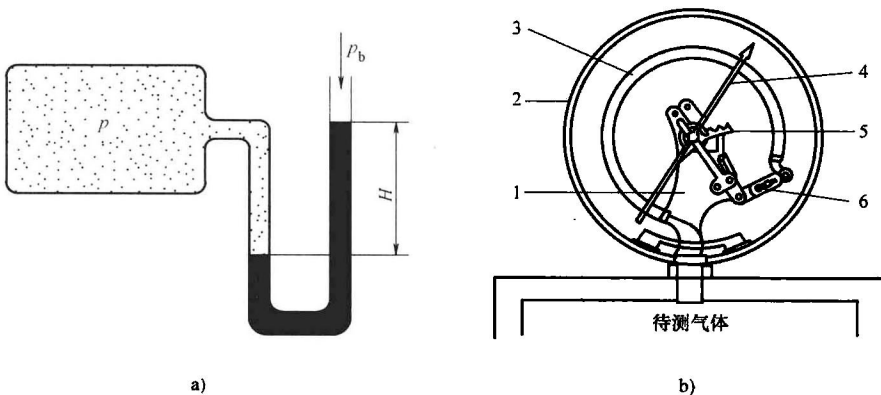


图 1-2 压力的测量

a) U 形管压力计 b) 弹簧管压力表

1—基座 2—外壳 3—弹簧管 4—指针 5—齿轮传动装置 6—拉杆

当绝对压力大于大气压力 ($p > p_b$) 时, 压力计指示的数值称为表压力, 用 p_g 表示, 有

$$p = p_g + p_b \quad (1-3)$$

当绝对压力小于大气压力 ($p < p_b$) 时, 压力计指示的数值称为真空度, 用 p_v 表示, 有

$$p = p_b - p_v \quad (1-4)$$

因此, 无论表压力还是真空度, 其值除与系统内的绝对压力相关, 还与测量时外界环境压力有关, 由于环境压力随时间、地点不同而不同, 因此, 即使表压力或真空度不变, 绝对压力也要随大气压力的变化而变化。只有绝对压力才是平衡态系统的状态参数, 进行热力计算时, 一定要用绝对压力。

国际单位制中压力的单位是帕斯卡, 简称帕, 符号是 Pa, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 表示, $1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$ 。工程上还可能遇到的压力单位有巴 (bar)、标准大气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米汞柱 (mmHg) 和毫米水柱 (mmH₂O), 它们与帕的换算关系见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算表

	Pa	bar	atm	at	mmHg	mmH ₂ O
Pa	1	1×10^{-5}	0.986923×10^{-5}	0.101972×10^{-4}	7.50062×10^{-2}	0.1019712
bar	1×10^5	1	0.986923	1.01972	750.062	10197.2
atm	101325	1.01325	1	1.03323	760	10332.3
at	98066.5	0.980665	0.967841	1	735.559	1×10^4
mmHg	133.3224	133.3224×10^{-5}	1.31579×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1	13.5951
mmH ₂ O	9.80665	9.80665×10^{-5}	9.07841×10^{-5}	1×10^{-4}	735.559×10^{-4}	1

在四冲程汽油机的工作循环中, 气缸内压力很高, 在进气行程, 压力略低于大气压, 为 0.08 ~ 0.09MPa; 在压缩行程, 压力升高, 为 0.8 ~ 1.5MPa。在做功行程, 火花塞产生电火花, 将气缸内的可燃混合气点燃, 火焰迅速传遍整个燃烧室, 同时放出大量的热能。燃烧气体的体积急剧膨胀, 压力迅速升高, 为 3.0 ~ 6.5MPa; 在气体压力的作用下, 气缸容积逐渐增大, 做功行程结束, 气缸内气体压力为 0.35 ~ 0.5MPa; 排气行程中, 膨胀过后的燃烧气体 (或称废气) 在其自身剩余压力和活塞的推动下, 经排气门排出气缸之外, 压力为 0.105 ~ 0.12MPa。

(2) 温度 温度是物体冷热程度的标志。微观上来讲是物体分子热运动的剧烈程度。热力学第零定律 (或称热平衡定律) 为温度的概念以及温度的测量提供了科学严谨的理论基础。当两个冷热程度不同的物体相互接触时, 它们之间将发生热量交换, 经过足够长时间后, 两个物体达到相同的冷热程度而不再进行热量交换, 两物体间最终达到的这种状况称为热平衡。热力学第零定律表明: 两个物体如果分别和第三个物体处于热平衡, 则这两个物体之间必然处于热平衡。根据这个定律, 处于热平衡的物体必定有一个宏观物理属性彼此相同, 两个物体的这种属性只要在数值上相等, 则不需要热接触也处于热平衡。将描述此宏观物理属性的物理量称为温度。换言之, 温度是决定系统间是否存在热平衡的物理量。因为温度是系统状态的函数, 所以它是一个状态参数。一切处于热平衡的系统其温度值均相等。

温度的数值表示称为温标。温标的核心内容是规定基准点和分度方法。

温标分为经验温标和热力学温标两类。经验温标是依据所选的测温介质的个别属性制定

的温标。除了基准点的温度值按规定相同外，其他的温度值都有微小差异，使温度的量度失去了共同的准绳。热力学温标是在热力学第二定律基础上引入的理论温标，由于热力学第二定律是一切物质共同遵循的规律，是物质的共同属性，与测温介质的个别属性无关，成为度量物体温度的共同标准。

热力学温标是国际规定的基本温标，用这种温标表示的温度叫热力学温度或绝对温度，以符号 T 表示，单位为开尔文，以符号 K 表示。热力学温标选用水的汽、液、固三相平衡共存的状态点——三相点为基准点，并规定它的温度为 273.15K。因此，1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.15$ 。绝对零度，即绝对温标的开始，是温度的最低极限，当达到这一温度时所有的原子和分子热运动都将停止。热力学第三定律指出，绝对零度不可能通过有限的降温过程达到，所以说绝对零度是一个只能逼近而不能达到的最低温度。目前，利用原子核的绝热去磁方法，已经得到了距绝对零度只差三千万分之一度的低温，但仍不可能得到绝对零度。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标，简称摄氏温标，以符号 t 表示，单位为摄氏度，以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。摄氏温标的定义式为

$$\{t\}_{\text{C}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15 \quad (1-5)$$

此式不但规定了摄氏温标的零点，而且说明摄氏温标和热力学温标的温度刻度完全一致，或者说两种温标的每一温度间隔完全相同。这样，热力系统两状态间的温度差，不论是采用热力学温标，还是采用摄氏温标，其差值相同，即 $\Delta T = \Delta t$ 。

四冲程往复活塞式内燃机在四个活塞行程内完成进气、压缩、做功和排气等四个过程，在进气行程中，空气和汽油的混合物通过进气门被吸入气缸，并在气缸内进一步混合形成可燃混合气，温度为 320 ~ 380K；在压缩行程中，气缸内的混合气被压缩，其压力和温度同时升高，温度为 600 ~ 750K；在做功行程中，安装在气缸盖上的火花塞产生电火花，将气缸内的可燃混合气点燃，火焰迅速传遍整个燃烧室，同时放出大量的热能。燃烧气体的体积急剧膨胀，压力和温度迅速升高，温度为 2200 ~ 2800K；在气体压力的作用下，气缸容积逐渐增大，行程结束，温度为 1200 ~ 1500K；在排气行程中，膨胀过后的燃烧气体（或称废气）在其自身剩余压力和活塞的推动下，经排气门排出气缸之外，温度为 900 ~ 1100K。

(3) 比体积 比体积是指单位质量的工质所占的体积，即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

式中， v 为比体积 (m^3/kg)； m 为质量 (kg)； V 为所占的体积 (m^3)。

比体积是描述分子聚集疏密程度的比参数，比体积与密度互为倒数，物理学中通常用密度，热力学中一般用比体积。

1.2.3 状态方程式

一个热力系统需要多少个独立状态参数才能确定状态呢？对于由气态工质组成的简单可压缩系统，与外界交换的准静态功只有体积变化功（膨胀功或压缩功）一种形式，因此，简单可压缩系统平衡态的独立状态参数只有两个。也就是说，对于简单可压缩系统，只要给定两个相互独立的状态参数就可以确定它的平衡态。如，一定量的气体在固定容积内被加热，其压力会随着温度的升高而升高。若容积和温度规定后，压力就只能具有一个确定不变的数值，状态即被确定。平衡态下温度、压力和比体积三个基本状态参数间的函数关系式称

为状态方程式, 可表示为

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-7)$$

或写成对某一状态参数的显函数形式:

$$T = f_1(p, v), p = f_2(v, T), v = f_3(p, T) \quad (1-8)$$

既然给出两个相互独立的状态参数就能完全确定简单可压缩系统的一个平衡态, 那么其他状态参数也随之确定, 关系为

$$u = u(T, v) \quad h = h(p, s)$$

对于只有两个独立参数的热力系统, 可以任选两个参数组成二维平面坐标图来描述被确定的平衡态, 这种坐标图, 称为状态参数坐标图。在该坐标图上任意一点即表示某一平衡态。热力学中最常用的是压容图 ($p-v$ 图) 和温熵图 ($T-s$ 图)。如图 1-3 所示, 图上的状态点 1 的坐标为 (p_1, v_1) 和 (T_1, s_1) , 分别表示该点的压力为 p_1 、比体积为 v_1 、温度为 T_1 、比熵为 s_1 。只有平衡态才能用图上的一点来表示, 非平衡态没有确定的状态参数, 在坐标图上无法表示。

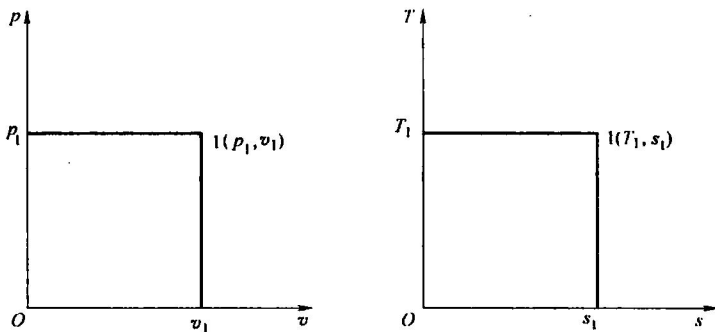


图 1-3 状态参数坐标图

1.2.4 热力过程

实际热工设备的能量传递和转换都是在不平衡势差的推动下通过工质的状态变化过程实现的。热力系统从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。

1. 准平衡过程 (准静态过程)

一切热力过程都是平衡状态被破坏的结果, 工质和外界有了热和力的不平衡才促使工质向新的状态变化, 因此, 一切实际过程都是不平衡的。若过程进行得相对缓慢, 工质在平衡被破坏后自动回复平衡所需的时间很短 (弛豫时间), 工质有足够的时间来恢复平衡, 不致随时显著偏离平衡状态, 这样的热力过程称为准平衡过程 (或称为准静态过程)。

实现准平衡过程的条件是推动过程进行的不平衡势差 (压力差、温度差等) 无限小, 而且系统有足够的时间恢复平衡。这对于一些热机来说, 在适当的条件下可以当做准平衡过程处理。例如, 在活塞式热力机械中, 活塞运动的速度一般在 10m/s 以内, 但气体的内部压力波的传播速度等于声速, 通常可达每秒几百米。相对而言, 活塞运动的速度很慢, 气体的变化过程比较接近准平衡过程。

准平衡过程中系统有确定的状态参数, 因此可以在坐标图上用连续的实线表示。

2. 可逆过程

可逆过程是热力学中从另一个角度定义的一类理想过程。定义为: 如果系统完成某一过

程之后，可以再沿原来的路径回复到起始状态，并使相互作用中涉及的外界也回复到原来状态，而不留下任何变化，则这一过程就称为可逆过程。否则就是不可逆过程。

上述定义实际上包含了两方面的意义。因为定义中的初态和末态是任意的，所以定义的第一个意义是系统经历一个可逆过程后，可以严格地按照原来的途径返回到最初的状态，因此，可逆过程必然是准静态过程；第二个意义是，可逆过程中不存在包括诸如摩擦、电阻、磁阻等的任何耗散损失，因此，在按其反过程返回初态后，没有给外界留下任何的痕迹。所以说，可逆过程就是无耗散效应的准静态过程。

准静态过程和可逆过程都是无限缓慢进行的，由无限接近平衡态所组成的过程。因此，可逆过程和准静态过程一样在坐标图上都可用连续的实线描绘。它们的区别在于，准静态过程只着眼于工质的内部平衡，没有涉及系统与外界功量和热量的交换；而可逆过程则是分析工质与外界作用所产生的总效果，不仅要求工质内部是平衡的，而且要求工质与外界的作用可以无条件地逆复，过程进行时不存在任何能量的耗散。因此，可逆过程必然是准静态过程，而准静态过程不一定是可逆过程。

实际过程都或多或少地存在着各种不可逆因素，都是不可逆的。例如，热能从高温物体转移到低温物体，虽然可以使热能自低温物体返回高温物体，但要付出一定代价，或者说不可能使过程所牵涉的整个系统全部都回复到原来状态。另外，当存在任何种类的耗散效应，如机械摩擦或工质摩擦时，所进行的过程也是不可逆的。因为无论正向和逆向过程中都会因摩擦而消耗机械功，这部分功转变成热量，而这部分热量转变成功需要付出一定代价。因此，有摩擦的过程也是不可逆的。

然而，对于不可逆过程进行分析计算往往相当困难，因为此时热力系统内部以及热力系统与外界之间不但存在着不同程度的不可逆，而且错综复杂。为了简便和突出主要矛盾，通常把实际过程当做可逆过程进行分析计算，然后再用一些经验系数加以修正，这正是引出可逆过程的实际意义所在。本章特别说明，除典型的不可逆过程（如节流、自由膨胀等）外，所有热力过程都可看成可逆过程。

例 1-1 判断下列过程是否可逆的，并扼要说明不可逆的原因。

- 1) 对刚性容器内的水加热，使其在恒温下蒸发。
- 2) 对刚性容器内的水搅拌做功，使其在恒温下蒸发。
- 3) 对刚性容器中的空气缓慢加热，使其从 50°C 升温到 100°C 。

解 1) 可以是可逆过程，也可以是不可逆过程，取决于热源温度与水温是否相等。若两者相等，则为可逆过程；若两者不等，则存在外部的传热不可逆因素，便是不可逆过程。

2) 搅拌过程伴有摩擦扰动，因而有内部不可逆因素，是不可逆过程。

3) 可以是可逆的，也可以是不可逆的，取决于热源温度与空气温度是否随时相等或随时保持无限小的温差。若加热过程足够慢，足以保证热源温度与空气温度随时相等或随时保持无限小温差时，为可逆过程；否则为不可逆过程。

1.2.5 功量及热量

在热力系统实施热力过程中，系统与外界由于不平衡势差的推动作用会发生两种方式的能量交换——做功和传热。

1. 功量

功是系统与外界间在力差的推动下，通过边界传递的能量。在力学中，功被定义为力与

力方向上的位移的乘积。在某一微小做功过程中，若在力 F 的作用下沿力的方向上移动微小位移 dx ，则力完成的微元功为

$$\delta W = F dx \quad (1-9)$$

若在力 F 作用下，系统从点 1 移到点 2，移动了有限距离，则所做的功为

$$W = \int_1^2 F dx \quad (1-10)$$

微元过程的功记作 δW ，而不用全微分符号 dW 。热力学中规定，系统对外做功时取正值，而外界对系统做功时取负值。

热力系统做功的方式是多种多样的，在工程热力学中，热和功的转换是通过气体的体积变化功（膨胀功或压缩功）来实现的，本节重点讨论体积变化功。下面导出可逆过程的体积变化功。

若取气缸中的气体为系统，活塞面积为 A ，气体的压力为 p ，如图 1-4 所示。当活塞移动一微小距离 dx 后，假设为可逆过程，外界压力必须与系统压力相等，系统对外做功为

$$\delta W = F dx = p A dx = p dV \quad (1-11)$$

如果活塞从点 1 移到点 2 时，则有

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-12)$$

对系统内质量为 1kg 的工质，则

$$\delta w = p dv \quad (1-13)$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-14)$$

可见，系统进行可逆过程时，对外所做的功可由系统的参数来计算，而无需考虑未知的外界参数。

从点 1 到点 2 的可逆过程中，工质与外界交换的功 $\int_1^2 p dV$ 在 p - V 图上相当于曲线 1-2 下的面积，功在 p - V 图上可以用曲线下的面积表示，因此， p - V 图也叫示功图。从图 1-4 可看出，功量大小与过程的路径有关。

实际过程都是不可逆的，由于存在机械摩擦而消耗一部分功，故外界获得的有效功要比工质所做的功 $\int_1^2 p dV$ 小。在进行热力学分析时，一般采用理想化的方法，即不考虑机械摩擦问题，计算热机功率时，根据实际情况对理论结果进行修正，工程中常用机械效率 η_m 来考虑机械摩擦损失对理论功率的修正。

2. 热量

热量是系统与外界间在温差的推动下，通过边界传递的能量。热量和功一样，都是系统和外界通过边界传递的能量，它们都是过程量，只有在能量传递过程中才有意义。如果说在某状态下有多少功或热量是毫无意义的，因为功和热量不是状态参数。功转变为热量是无条件的，而热量转变为功是有条件的。

热量用符号 Q 表示，法定单位为 J 或 kJ。单位质量工质与外界交换的热量用符号 q 表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg。热力学中规定，系统吸热时热量取正值，放热时取负值。

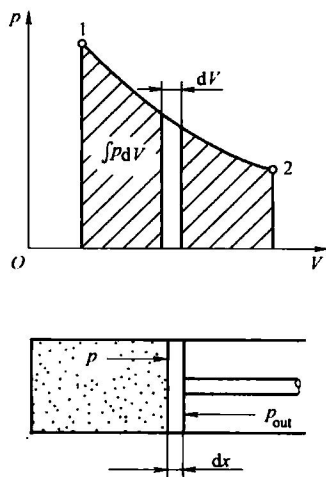


图 1-4 可逆过程的体积变化功

关于热量的计算，在物理学中用比热容计算热量，即 $\delta Q = mc dT$ 或 $Q = \int_1^2 mc dT$ ， c 为工质的比热容。

在这里，引出一个与热量有密切关系的热力学状态参数——熵，用符号 S 表示。熵是由热力学第二定律引出的状态参数，定义式为

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (1-15)$$

式中， δQ 为系统在微元可逆过程中与外界交换的热量； T 为传热时系统的热力学温度； dS 为此微元过程中系统熵的变化量。

这个定义式只适用于可逆过程。

每千克工质的熵称为比熵，用 s 表示，比熵的定义为

$$ds = \frac{dS}{m} = \frac{\delta q}{T} \quad (1-16)$$

$ds > 0$ ，则 $\delta q > 0$ ，系统吸热；

$ds < 0$ ，则 $\delta q < 0$ ，系统放热；

$ds = 0$ ，则 $\delta q = 0$ ，系统绝热。

可逆绝热过程称为定熵过程。

因为 $\delta Q = TdS$ ，所以 $Q_{1-2} = \int_1^2 \delta Q = \int_1^2 TdS$ 。因此，在 $T-S$ 图上，任意可逆过程曲线与横坐标所包围的面积，即为在此热力过程中热力系统与外界交换的热量，如图 1-5 所示，因此， $T-S$ 图也叫示热图。示热图与示功图一样，是对热力过程进行分析的重要工具。

1.2.6 热力循环

在内燃机中，工质在经过进气、压缩、做功、排气变化后，重新回复到初始状态，周而复始地循环工作。热力学中把系统由初始状态出发，经过一系列的中间状态变化，又回复到初始状态所完成的一个封闭的热力过程称为热力循环，如图 1-6 所示。系统实施热力循环的目的显然不是要使系统获得某种状态变化，而是通过热力系统的状态变化实现预期的能量转换。

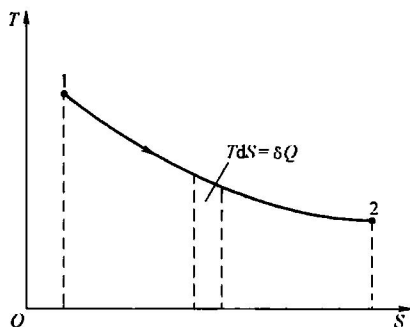


图 1-5 $T-S$ 图及可逆过程热量的表示

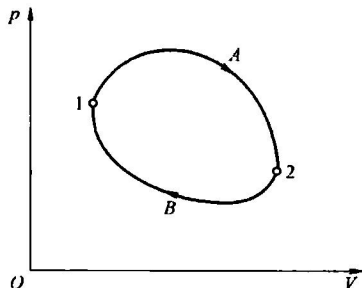


图 1-6. 热力循环

全部由可逆过程组成的循环称为可逆循环。系统经过一个可逆循环后，整个系统与外界都恢复到原态，而不留下任何改变，可逆是一种理想循环。如果循环中有部分过程或者全部过程是不可逆的，就是不可逆循环。不可逆循环中存在一定的内外耗散（如摩擦、散热

等), 实际循环均属于不可逆循环。

根据循环效果和进行的方向, 可以把循环分为正向循环和逆向循环。将热能转换为机械能的循环称为正向循环, 它使外界获得功; 将热量从低温物体传到高温物体的循环称为逆向循环, 其必然消耗外功。

1. 正向循环

正向循环又称为热动力循环。如蒸汽动力装置循环、内燃机及燃气轮机装置循环等。在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图 (图 1-7a、b) 上, 都是沿着顺时针方向变化的。

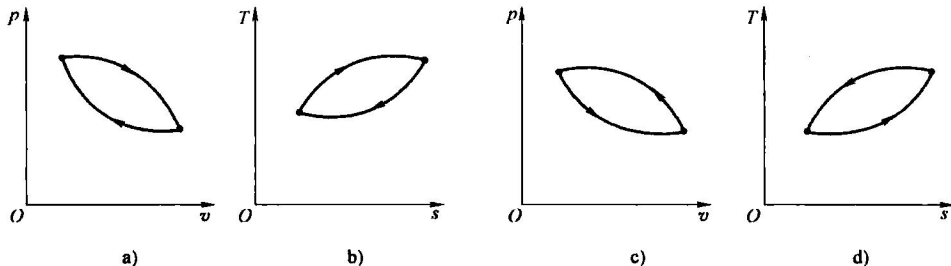


图 1-7 正向循环和逆向循环

a) 正向循环 $p-v$ 图 b) 正向循环 $T-s$ 图 c) 逆向循环 $p-v$ 图 d) 逆向循环 $T-s$ 图

对于单位质量的工质来说, 正向循环的总效果是从高温热源吸收 q_1 的热量, 对外做出 w_{net} 的循环净功, 同时向低温热源排放 q_2 的热量。热机循环的经济性用循环热效率 η_1 来表示, 即

$$\eta_1 = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (1-17)$$

循环热效率是评价热机循环中热能转换为机械能有效程度的经济性指标, 循环热效率的值越大, 热机循环的工作越有效, 但其值不可能达到 100%。

2. 逆向循环

逆向循环又可分为制冷循环和供热循环 (即热泵循环)。在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上 (图 1-7c、d) 上, 都是沿着逆时针方向变化的。对于单位质量的工质来说, 逆向循环的总效果是消耗 w_{net} 的循环净功, 从低温热源吸收 q_2 的热量, 同时向高温热源排放 q_1 的热量。

(1) 制冷循环 其目的是将低温热源的热量 q_2 排向环境, 形成一个比环境温度低的空间, 便于保存食物或在夏天给人们提供一个更舒适的环境。制冷循环的经济性指标可用制冷系数 ε 表示, 有

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w_{\text{net}}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} \quad (1-18)$$

(2) 供热循环 它主要是在冬天从环境 (低温热源) 吸取热量, 向房间 (高温热源) 供热, 热泵的收益是向高温热源排放热量 q_1 , 其经济性指标可用供热系数 ε' (供暖系数或热泵系数) 表示, 则有

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{w_{\text{net}}} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} > 1 \quad (1-19)$$

逆向循环的制冷系数与供热系数是评价制冷循环和供热循环工作的有效程度的经济性指标, 制冷系数 ε 可能大于 1, 或等于 1, 或小于 1; 供热系数 ε' 总是大于 1, 其值越大, 表明

经济性越好。

1.3 热力学第一定律

热力学第一定律阐述了热能与其他形式能量转换过程中能量守恒的原理。其数学表达式为闭口系统能量方程式、开口系统能量方程式及稳定流动能量方程，它们是进行能量转换分析的基本关系式。

1.3.1 热力学第一定律及其实质

能量守恒定律是自然界的基本定律之一：自然界中一切物质都具有能量，能量有各种不同形式，它可以从一个物体或系统传递到另外的物体和系统，能够从一种形式转换成另一种形式，在能量传递和转换的过程中，能量的“量”既不能创生也不能消灭，其总量保持不变。

将能量守恒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。它可以表述为：热可以转变为功，功也可以转变为热；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。即热能可以转变为机械能，机械能可以转变为热能，在它们的传递和转换过程中，总量保持不变。历史上，有些人曾幻想不花费能量而产生动力的机器，称为第一类永动机，却从来没有人试制成功。因此，热力学第一定律又可表述为：“第一类永动机是不可能造成的”。

热力学第一定律是人类在实践中对大量宏观现象的经验总结，能否适用于微观结构中的少量微粒，或推广至整个宇宙，还有待进一步研究。

1.3.2 热力学能

热力学能是以一定方式储存于热力系统内部的能量。当不涉及化学变化和原子核反应时，热力学包括分子运动所具有的内动能、分子间由于相互作用力所具有的内位能。根据分子运动论，分子的内动能与工质的温度有关；分子的内位能主要与分子间的距离，即工质占据的体积有关。由于工质的热力学能只取决于工质的热力学温度和一定质量工质所占据的体积，即取决于工质的热力状态，是广延量状态参数，可表示为

$$U = f(T, V) \quad (1-20)$$

单位质量工质的热力学能称为比热力学能 u ，是由广延量转换得到的强度量，有

$$u = \frac{U}{m} \quad (1-21)$$

工质的热力学能用 U 表示，国际单位为 J 或 kJ。比热力学能 u 的国际单位为 J/kg 或 kJ/kg。

除了储存在热力系统内部的热力学能外，从热力系统外部的总体而言，还具有宏观动能 E_k 和宏观势能 E_p 。

热力系统由于处于宏观运动状态而具有宏观动能，若工质质量为 m ，当热力系统以速度 c 作宏观运动时，有

$$E_k = \frac{1}{2} mc^2 \quad (1-22)$$

热力系统由于重力场作用而具有宏观势能。如果质量 m 的系统的质心在系统外部参考坐标系中的高度为 z 时，有

$$E_p = mgz \quad (1-23)$$

式中, g 为重力加速度。

热力系统所储存的总能量(储存能)是热力学能和外部储存能的总和,即

$$E = U + E_k + E_p \quad (1-24)$$

单位质量工质的总储存能称为比储存能 e , 单位为 J/kg 或 kJ/kg, 有

$$e = u + e_p + e_k \quad (1-25)$$

系统储存能的变化量为

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (1-26)$$

或

$$dE = dU + dE_k + dE_p \quad (1-27)$$

在研究能量转换时, 需要考虑系统储存能的变化, 而不是其储存能的绝对值。

1.3.3 闭口系统能量方程

热能和机械能的转换过程, 总是伴随着能量的传递和交换。这种交换不但包括功量和热量的交换, 而且包括因工质流进流出而引起的能量交换。根据热力学第一定律的“量”的守恒原则, 可以得到热力学第一定律一般表达式为

进入系统的能量 - 流出系统的能量 = 系统能量的增量

在实际热力过程中, 许多系统都是闭口系统, 热力过程中它与外界的能量交换只限于通过边界传递热量和功, 如活塞式压气机的压缩过程、内燃机的压缩和膨胀过程等。

如图 1-8 所示, 气缸壁和活塞为边界, 以气缸活塞包围的气体为热力系统, 此系统与外界无物质交换, 属于闭口系统。对于封闭在活塞气缸内的工质, 经历了一个热力过程后, 宏观动能和重力势能没有变化, 储存能的变化就等于热力学能的变化。因此, 闭口系统能量方程为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-28)$$

式中, Q 为从外界吸取的热量; W 为对外所做的膨胀功; $\Delta U = U_2 - U_1$ 为热力学能变化。

对于单位质量工质, 闭口系统的能量方程为

$$q = \Delta u + w \quad (1-29)$$

对于微元变化过程, 闭口系统的能量方程为

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (1-30)$$

或

$$\delta q = du + \delta w \quad (1-31)$$

闭口系统的能量方程式(1-28)和式(1-29)等在推导过程中, 除要求系统是闭口系统, 即控制质量系统外, 没有附加任何其他条件, 因此适用于一切过程和工质。

将式(1-28)变为

$$Q - \Delta U = W \quad (1-32)$$

可以看到, 要把工质的热能(包括内热能和从外界获得的热量)转换为机械能, 必须通过工质体积的膨胀才能实现。该闭口系统的能量方程反映了热能和机械能这种转换的基本原理和关系, 因此称为热力学第一定律的基本表达式。

如前所述, 对于可逆过程, 有

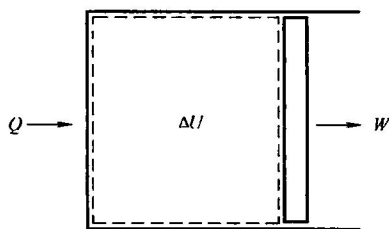


图 1-8 气缸活塞装置