

内燃机原理及 公路工程机械理论

陈克敏 主编
交通系统中等专业学校试用教材
(公路工程机械运用与修理专业用)

人民交通出版社



交通系统中等专业学校试用教材

NEIRANJI YUANLI JI GONGLU GONGCHENG JIXIE LILUN

内燃机原理及公路工程机械理论

(公路工程机械运用与修理专业用)

陈克敏 主编

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书内容包括内燃机原理、公路工程机械理论、内燃机及公路工程机械试验等。

本书除作公路工程机械运用与修理专业的教材外,还可作为建筑、港口、矿山、森工、起重运输等工程机械专业相应课程的教学参考书,并可供从事内燃机、工程机械方面实际工作的技术人员学习参考。

交通系统中等专业学校试用教材
内燃机原理及公路工程机械理论
(公路工程机械运用与修理专业用)

陈克敏 主 编

正文设计 周 元

责任校对 王静红

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 14.75 字数: 365 千

1990年6月 第1版

1990年6月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3000册 定价: 2.65元

前 言

本书是根据1987年修改的公路工程机械运用与修理专业《内燃机原理及公路工程机械理论》教学大纲编写的。在编写过程中，我们力求理论联系实际，革新教材内容；强调基本理论、基本知识和基本技能；重视不同结构、使用条件的影响因素分析，尽力体现专业实际和专业特点。

本书内容包括内燃机原理、公路工程机械理论、性能测试和试验三部分。

学生通过学习工程热力学基础知识，分析内燃机的工作循环，了解内燃机的工作过程，并对其性能进行具体分析，从而找出发挥内燃机动力性、经济性和耐久性的有效途径，能够在不同的使用条件下合理运用内燃机；在分析轮式和履带式公路工程机械运动基本规律的基础上，研究公路工程机械的主要使用性能和评价指标，找出影响它的各种因素和保持良好的使用性能的各种正确有效途径；通过性能测试与试验，掌握评价、鉴定内燃机和公路工程机械性能的基本理论与方法，提高实际操作技能。

本书由陈克敏高级讲师主编，郑训高级讲师主审。参加编写的有郑林儿高级讲师（第一篇第二章、第二篇第五章）、武华讲师（第三篇）、刘杰讲师（第二篇第一章、第二章、第六章）、浙江省交通学校教师陈小鹏（第二篇第四章、第七章），其余篇章由陈克敏同志编写。

由于编者水平有限，书中一定有错漏之处，敬请使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

1988年10月

目 录

第一篇 内燃机原理

第一章 工程热力学基础知识.....	1
§1-1 气体的热力性质.....	1
§1-2 热力学基本定律.....	8
§1-3 气体热力过程分析.....	11
第二章 内燃机燃料与燃烧.....	18
§2-1 石油液体燃料.....	18
§2-2 汽油的使用性能.....	21
§2-3 柴油的使用性能.....	25
§2-4 燃烧热化学.....	27
第三章 内燃机工作过程.....	32
§3-1 内燃机理论循环.....	32
§3-2 四冲程内燃机的实际循环.....	39
第四章 内燃机的性能指标.....	43
§4-1 指示指标.....	43
§4-2 有效指标.....	45
§4-3 机械损失.....	47
§4-4 内燃机热平衡.....	52
第五章 内燃机的换气过程.....	54
§5-1 四冲程内燃机的换气过程.....	54
§5-2 充气量与充气系数.....	57
§5-3 影响充气系数的因素.....	59
§5-4 提高充气系数的措施.....	61
§5-5 柴油机废气涡轮增压.....	64
第六章 柴油机的混合气形成与燃烧过程.....	71
§6-1 柴油混合气形成与柴油的雾化.....	71
§6-2 柴油机的燃烧过程.....	74
§6-3 影响柴油机燃烧过程的主要因素.....	77
§6-4 柴油机燃烧室对混合气形成及燃烧的影响.....	79
第七章 汽油机的燃烧过程.....	88
§7-1 燃烧过程的进行.....	88
§7-2 影响汽油机燃烧过程的因素.....	91
§7-3 内燃机的排气污染与净化.....	94

第八章 内燃机的特性	96
§8-1 内燃机的工况.....	96
§8-2 内燃机的负荷特性.....	97
§8-3 内燃机的速度特性.....	99
§8-4 柴油机工作的稳定性和调速特性.....	104
§8-5 内燃机的万有特性.....	108

第二篇 公路工程机械理论

第一章 轮式公路工程机械的行驶原理	110
§1-1 轮式机械的行驶.....	110
§1-2 车轮运动学.....	111
§1-3 车轮动力学.....	112
§1-4 轮式机械行走装置的效率.....	114
§1-5 多桥驱动的寄生功率.....	117
§1-6 轮式机械的行驶阻力.....	119
§1-7 轮式机械行驶时的充分条件与必要条件.....	124
第二章 轮式公路工程机械的动力性	125
§2-1 轮式机械驱动力与行驶阻力平衡方程.....	125
§2-2 轮式机械的动力特性.....	127
§2-3 轮式机械的加速性能.....	130
§2-4 轮式机械的功率平衡.....	133
§2-5 影响轮式机械动力性的因素.....	136
第三章 履带式公路工程机械的行驶理论	138
§3-1 履带式公路工程机械的行驶原理.....	138
§3-2 履带行走装置的运动学.....	140
§3-3 履带式行走装置的动力学.....	143
§3-4 履带式拖拉机的附着性能.....	146
第四章 履带式拖拉机的牵引性能	149
§4-1 履带式拖拉机的牵引平衡.....	149
§4-2 履带式拖拉机的功率平衡和牵引效率.....	151
§4-3 履带式拖拉机的牵引特性.....	153
第五章 公路工程机械的燃料经济性	159
§5-1 载货汽车燃料经济特性.....	159
§5-2 影响载货汽车燃料经济性的使用因素.....	162
§5-3 拖拉机的燃料经济特性.....	164
第六章 轮式公路工程机械的制动性	165
§6-1 制动时车轮的制动力.....	165
§6-2 制动性的评价指标.....	168
§6-3 制动稳定性.....	173

§6-4	影响制动性的因素	175
第七章	公路工程机械的行驶稳定性	178
§7-1	轮式机械的行驶稳定性	179
§7-2	轮式机械抗侧向偏离的行驶稳定性	182
§7-3	履带式机械的行驶稳定性	184
第八章	履带式公路工程机械转向理论	187
§8-1	履带式公路工程机械转向运动学及动力学	187
§8-2	具有转向离合器机构的履带式公路工程机械的转向性能	190

第三篇 内燃机及公路工程机械试验

第一章	内燃机试验	194
§1-1	内燃机试验及试验设备	194
§1-2	温度的测量	196
§1-3	压力的测量	198
§1-4	功率的测量	199
§1-5	转速的测量	204
§1-6	燃料消耗量的测量	207
第二章	载货汽车牵引性能试验	209
§2-1	道路试验	209
§2-2	道路试验中常用的仪器设备	211
§2-3	室内试验	215
第三章	公路工程牵引机械的牵引试验	216
§3-1	各项牵引性能参数的测定方法	217
§3-2	牵引试验方法	221
§3-3	牵引试验常用的仪器设备	222
主要参考文献		228

第一篇 内燃机原理

内燃机原理这一篇，是以研究内燃机性能指标为对象。通过学习工程热力学基础知识，讨论内燃机工作过程的各个阶段，分析影响性能指标的各种因素，从理论上明确提高发动机动力性、经济性和耐久性的一般规律；了解提高性能指标的具体措施和努力方向；掌握在不同的使用条件下合理运用内燃机和评价、鉴定内燃机的基本方法。

第一章 工程热力学基础知识

本章就讨论内燃机原理所必需的热力学知识做一扼要介绍，其主要内容为：

- 1.工质的热力性质；
- 2.热能和机械能之间互相转换的规律，主要有热力学第一定律、能量方程、热力学第二定律等；
- 3.工质的热力状态变化过程、基本热力参数之间的关系和变化。

§1-1 气体的热力性质

一、气体的热力状态及其基本状态参数

在内燃机中，热能向机械能的转换是通过气体状态的变化来实现的。在气缸内，气体不断经历着压缩、吸热、膨胀、放热等热力过程，在宏观上表现为气体的物理特性，如压力、温度等在不断变化，即气体的热力状态在不断变化。我们把描述气体热力状态的宏观物理量称为状态参数，又把其中可以直接测量的参数如温度、压力、比容等称为基本状态参数。

(一)温度

温度表示物体的冷热程度。按分子运动学说，气体的温度乃是气体分子平均移动动能的量度，温度高即气体分子平均移动动能大，温度低即分子平均移动动能小。

$$t = T - T_0$$

即

$$t = T - 273.15\text{K}$$

所定义的摄氏温度以字母 t 表示。

式中 $T_0 = 273.15\text{K}$ ，即水的冰点的热力学温度。水的三相点的热力学温度比其冰点高 0.01K 。

摄氏温度用“摄氏度”代号 $^{\circ}\text{C}$ 表示，温度单位“摄氏度”与“开尔文”度衡间隔是相等的，只是摄氏温度的零点，比热力学温度开尔文的零点高 273.15K 。

在这里要特别指出，只有热力学温度开尔文（也称绝对温度）才可作为状态参数。

(二) 压力

气体对单位面积容器壁面的垂直作用力称为压力。以字母 p 表示。一定容积内气体压力的实质是气体大量分子在紊乱的热运动中对容器壁面频繁撞击的平均效果。压力的单位是帕斯卡 (Pa)。因为这一单位太小, 为实用上方便, 一般用千帕 (kPa) 也可用兆帕 (MPa)。

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

气体压力通常是使用压力计或真空计来测量的。如图 1-1 所示。因为压力计本身都处在大气压力的作用之下, 所以压力计的读数都是被测气体的压力与外界大气压力的差值, 称表压力, 用字母 $p_{\text{表}}$ 表示。如果气体的绝对压力以 $p_{\text{绝}}$ 表示, 大气压力以字母 p_0 表示, 则有:

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{表}} + p_0$$

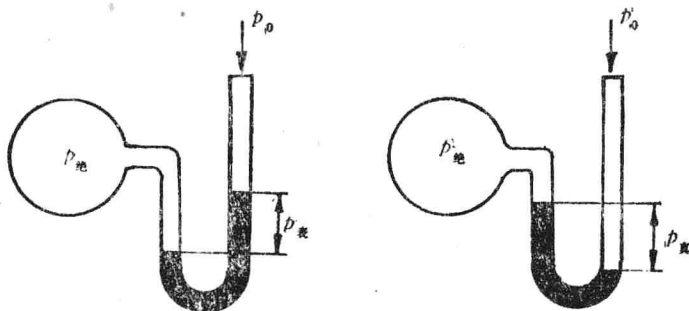


图1-1 表压力和真空度

如果气体的绝对压力低于外界大气压时, 真表压力是真空度, 以字母 $p_{\text{真}}$ 表示。则:

$$p_{\text{真}} = p_0 - p_{\text{绝}}$$

即

$$p_{\text{绝}} = p_0 - p_{\text{真}}$$

表压力、真空度称为相对压力。而通常所说气体状态参数的压力是指其绝对压力。它们之间的关系如图 1-2 所示。

(三) 比容

气体的比容是单位质量气体所占有的容积, 以字母 v 表示:

$$v = \frac{V}{m} \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

式中: V ——气体总容积 (m^3);

m ——气体质量 (kg)。

反之, 单位容积气体的质量称为密度, 以字母 ρ 表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

显然, 气体的比容 v 与密度 ρ 互为倒数。

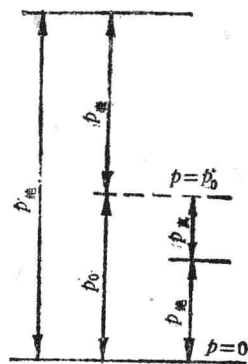


图1-2 绝对压力与相对压力的关系

二、工质及其平衡状态、热力系统、热力过程

(一) 工质及其平衡状态

1. 工质

工程热力学中, 把实现热能与机械能相互转换的工作物质称为“工质”。内燃机的工质, 通常是气体。这是因为气体具有最好的流动性、可压缩性和膨胀性, 便于迅速引进内燃

机内，作功以后又能迅速排出内燃机。在相同的压差下，其膨胀比最大，因而能够更有效地做功；同时气体的热力性质最简单，可以简化为理想气体。

2. 气体的平衡状态

气体的平衡状态包括热平衡和力平衡两个方面，即气体的各部分的温度和压力处处相等并且不随时间而变化，它是气体在既定外界作用的情况下可以长久保持的状态，这时气体各部分的状态均匀一致，每一状态参数只有一个数值。气体的一个平衡状态对应有一组唯一的参数（如 p 、 v 、 T 等）。其中一个状态参数发生了变化，则说明气体的状态发生了变化。同时，只要知道了两个独立的状态参数（如压力 p 和温度 T ）即可以确定工质所处的状态，这时其余所有的状态参数都可以通过这两个已知的独立的状态参数计算确定。此后书中所涉及的状态都是指的平衡状态。

气体的平衡状态既然可以由两个独立的状态参数来确定，那么由任意两个独立的状态参数所组成的平面直角坐标系上的任意一点都对应于气体的某一平衡状态，如压力 p 与比容 v 组成的坐标图（简称压容图，见图 1-3）。其中 1 点、2 点分别代表 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态。

(二) 热力系统

在内燃机中，能量的转换是通过工质在气缸内的状态变化来实现的。在热力学中规定把某一尺寸范围内的工质定作研究的对象——“热力系统”，简称热力系。而把包围工质的物体（如气缸）称为“外界”。它们之间有“分界面”，根据分界面上质量和能量交换的情况，热力系统主要分为：

1. 开口系统：和外界有质量交换的系统；
2. 闭口系统：和外界无质量交换的系统，它是开口系统的特例，凡和外界无热量交换的系统又统称为绝热系统。

(三) 热力过程

热力过程是指热力系统在外界条件作用下从某一状态变化到另一状态所经历的全部状态的总和。热力过程种类很多，本书只讨论平衡过程和可逆过程。

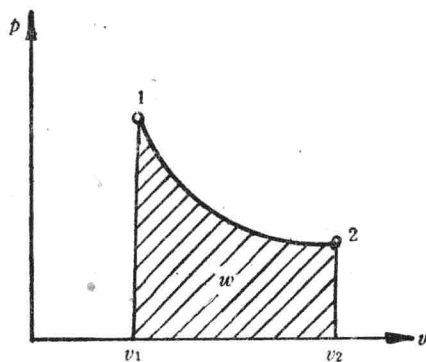


图1-4 可逆过程

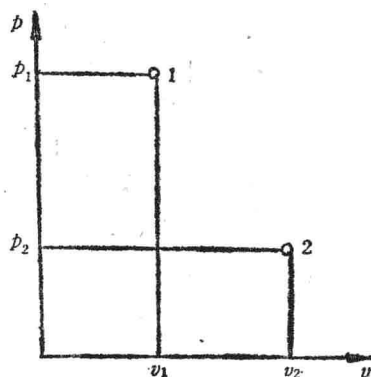


图1-3 平衡状态

平衡过程即热力系统从一平衡状态连续地经过无数个平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态的热力过程。平衡过程在压容图上可用一条连续的曲线来表示，如图 1-4 所示。在平衡过程中系统随时与外界保持热平衡，即热量的传递是在没有温差的条件下进行的，它是实际过程的近似描写。

可逆过程：假设热力系统经历平衡过程 1—2 由状态 1 变化到 2，并对外作膨胀功 w ，见图 1-4。如果外界给以同样大小的压缩功 w 使系统从状态 2 反向循着原来的过程曲线经历完

全相同的中间状态回复到原来的状态 1，外界也回复到原来的状态，既没有得到功，也没有消耗功，这样的平衡过程称为可逆过程。

只有无摩擦、无温差的平衡过程才有可逆性，即可逆过程就是无摩擦、无温差的平衡过程。

可逆过程是没有任何损失的理想过程，实际的热力过程既不可能是绝对的平衡过程，又不可避免地会有摩擦。因此，可逆过程是实际过程的理想极限，今后我们所讨论的主要是可逆过程。

三、理想气体状态方程

所谓理想气体就是假设在气体内部其分子不占有体积，分子间又没有吸引力，这样的气体称为理想气体。在热力计算和分析中，常常把空气、燃气、烟气等真实气体都近似地看作理想气体。因为这些气体分子之间的平均距离通常要比液体和固体的大得多，所以，气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多，气体分子之间的相互吸引力也很小。通常把真实气体近似地看作理想气体来进行各种热力计算，其结果极其相似。因此，对理想气体性质的研究在理论上和实际上都是很重要的。

科学的试验证明，理想气体的三个基本状态参数 p 、 v 、 T 之间有着内在的联系，通过分子运动论，对于 1kg 理想气体可以导出如下关系：

$$\frac{pv}{T} = R$$

或

$$pv = RT \tag{1-1}$$

即理想气体每一状态下的绝对压力和比容的乘积除以绝对温度其商是一个常数。这一常数称为该理想气体的“气体常数”，以字母 R 表示。式(1-1)称为理想气体方程式，又称为克拉贝隆方程式。

对 m 千克理想气体则有：

$$p(mv) = mRT$$

即

$$pV = mRT \tag{1-2}$$

式中： $V = mv$ —— m 千克气体的总容积(m^3)。

理想气体状态方程的重要意义在于，它指出了在某一状态下，理想气体的三个基本状态部分理想气体在0℃时的比热和摩尔比热、摩尔质量和气体常数

表1-1

	c_p [kJ/(kg·K)]	c_v [kJ/(kg·K)]	C_p [kJ/(kmol·K)]	C_v [kJ/(kmol·K)]	摩尔质量 M [kg/kmol]	气体常数 R [kJ/(kg·K)]	绝热指数 $k = c_p/c_v$
He	5.2377	3.1605	20.9644	12.6501	4.0026	2.0772	1.66
Ar	0.5203	0.3122	20.7858	12.4715	39.948	0.2081	1.66
H ₂	14.2003	10.0754	28.6228	20.3085	2.01565	4.1249	1.409
N ₂	1.0389	0.7421	29.0967	20.7824	28.006148	0.2969	1.400
O ₂	0.9150	0.6551	29.2722	20.9579	31.98983	0.2598	1.397
空气	1.0043	0.7171	29.0743	20.7600	28.95	0.2872	1.400
CO	1.0403	0.7433	29.1242	20.8099	27.994915	0.2970	1.400
NO	0.9983	0.7211	29.9464	21.6321	29.997989	0.2772	1.384
CO ₂	0.8169	0.6279	35.3336	27.6193	48.98983	0.1890	1.301
N ₂ O	0.8507	0.6618	37.4326	29.1183	44.001063	0.1890	1.285
SO ₂	0.6092	0.4792	38.9666	30.6523	63.962185	0.1300	1.271

参数 p 、 v 、 T 不是互不相关，而是有内在联系的，只要知道其中的两个就可以通过该方程式求得第三个。它证明了前面提到的这一事实：即只要知道气体的两个独立的状态参数就足以确定工质的一个状态。

气体常数 R 的单位可由式(1-1)导出：

$$R = \frac{(p)(v)}{(T)}, \text{ 其单位为: } \frac{(\text{N/m}^2) \cdot (\text{m}^3/\text{kg})}{(\text{K})} = \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) = [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

不同的气体有其固有的气体常数 R 值，它只与空间各种气体的种类有关。见表1-1。

四、摩尔、通用气体常数、摩尔气体方程

(一) 摩尔、摩尔质量

国际单位制规定，摩尔 (mol) 是物质的量的单位，它的定义是：摩尔是一物系的物质的量，该物系所包含的结构粒子数与 0.012kgC^{12} 的原子数目相等。

在使用这一单位时，物系所包含的结构粒子为分子。则 1mol 某物质，就等于 $0.001M\text{kg}$ 某物质，其中 M 则为该物质的分子量。

千摩尔 (kmol) 某物质的量 $M(\text{kg})$ ：“摩尔质量” $M(\text{kg}/\text{kmol})$ ， M 又称千克分子量。

m 千克气体的千摩尔数 n 为：

$$n = \frac{m}{M}$$

例如，一个千摩尔氧为 $32(\text{kg})$ ，即 $M_{\text{O}_2} = 32(\text{kg}/\text{kmol})$ ，一个千摩尔的氢气为 $2(\text{kg})$ ，即 $M_{\text{H}_2} = 2(\text{kg}/\text{kmol})$ 。

(二) 通用气体常数

根据阿佛加德罗定律，即“在同温同压下，相同容积的各种理想气体具有相同的分子数”。由此可以推论：“在同温同压下，分子数相同的各种气体，它们的容积应该相等”。

根据摩尔的定义， 1mol 的任何气体，其所包含的分子数都是相等的。取 M 千克气体，即 1kmol 气体作为计量单位，其对应的气体容积为 Mv ——“摩尔容积”。显然，在同温同压下任何气体的摩尔容积相等。若取标准状态即压力 $p_0 = 1.01325\text{kPa}$ ，温度 $T_0 = 273.15\text{K}$ ，则标准状态下各种气体的摩尔容积均为 $Mv_0 = 22.414$ (标准 m^3/kmol)。

设有两种气体，它们的分子量分别为 M_1 和 M_2 ，气体常数分别为 R_1 和 R_2 ，在相同的压力 p 和温度 T 下，它们的比容分别为 v_1 和 v_2 。取 M_1 千克第一种气体和 M_2 千克第二种气体分别写出其状态方程：

$$pM_1v_1 = M_1R_1T$$

$$pM_2v_2 = M_2R_2T$$

因为

$$M_1v_1 = M_2v_2$$

所以

$$M_1R_1 = M_2R_2$$

上式说明，各种气体其 MR 值是相等的，它和气体种类无关。同时 M 和 R 本身都与气体的状态无关。因此 MR 既与气体种类无关，又与气体状态无关。 MR 称为“通用气体常数”或“摩尔气体常数”。其数值可以由任一气体的标准状态来确定：

$$MR = \frac{p_0 M v_0}{T_0} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15} = 8314.3 \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right)$$

显然

$$R = \frac{8314.3}{M} [\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

(三) 摩尔气体状态方程

1 千摩尔气体的状态方程为:

$$pMV = MRT = 8314T \quad (1-3)$$

n 千摩尔气体的状态方程为:

$$pV = nMRT = 8314nT \quad (1-4)$$

式(1-3)、或(1-4)称为摩尔气体状态方程。

五、工质的比热

工质的比热就是单位量的工质作单位温度变化时所吸收或放出的热量。在工程热力学中, 常常利用工质比热来进行热量的计算。其定义为:

$$c = \frac{dq}{dT} \quad (1-5)$$

式中: c ——某工质在某一状态下的比热;

dq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 时所吸收或放出的热量。单位是千焦耳(kJ)或焦耳(J)。

比热是一个物性参数。它不是工质的状态参数。比热的数值因工质种类不同而异, 见表 1-1。对于同一种工质, 其比热还和物量的单位、加热过程的性质及加热时的状态等有关。

(一) 质量比热、摩尔比热、容积比热——比热与物质单位的关系

工质计量单位可用千克、摩尔、米³。因而工质的比热相对应地有:

质量比热 C	$[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
摩尔比热 c	$[\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$
容积比热 c'	$[\text{kJ}/(\text{标m}^3 \cdot \text{K})]$

因为 1(kmol) 工质的质量是 $M(\text{kg})$, 其对应的标准容积是 22.4(m³), 则这三种比热有如下关系:

$$c = c' \times 22.4 = M \times c \quad (1-6)$$

(二) 等压比热和等容比热——比热与热力过程性质的关系

工质的比热与工质从某一状态到另一状态所经历的热力过程有关, 不同的加热或放热过程有不同的比热。工程热力学中最常见的有两种:

等压比热 c_p ——工质在压力不变的条件下加热;

等容比热 c_v ——工质在容积不变的条件下加热。

同样, 由于工质计量单位的不同可分为等压质量比热 $c_p[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, 等压摩尔比热 $c_p[\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$, 等压容积比热 $c_p'[\text{kJ}/(\text{标m}^3 \cdot \text{K})]$; 以及等容质量比热 $c_v[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, 等容摩尔比热 $c_v[\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})]$, 等容容积比热 $c_v'[\text{kJ}/(\text{标m}^3 \cdot \text{K})]$ 。

(三) 真实比热与平均比热——比热与加热时工质的状态的关系

工质的比热并不是一个不变的常量, 它是一个变化的物理量。工质比热的变化与压力的关系不大, 它是随着温度的升高而增大的。例如使空气以 0℃ 升高到 1℃ 与使空气从 100℃ 升高到 101℃ 所需要的热量是不同的。一般说来, 理想气体的比热与温度的关系是:

$$c = a + bt + et^2$$

式中 a 、 b 、 e 是常数，它们的数值随气体的种类及加热的过程不同而异。

如果以比热 c 为纵坐标，温度 t 为横坐标，则 $c-t$ 的关系曲线如图 1-5a) 所示。可见不同的温度对应着不同的比热。工质在每一温度下所对应的比热称为工质的真实比热。如果 $c = f(t)$ 的函数关系已知，则工质从 t_1 到 t_2 温差范围内的热量 q_{1-2} 就必须积分。

$$dq = c dt = f(t) dt$$

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \text{面积 } 12t_2t_1$$

为了简化计算，在求热量时经常采用“平均比热”—— $c_m|_{t_1}^{t_2}$ 。平均比热就是在一定温差范围内单位物质所吸收或放出的热量和温差的比值（见图 1-5b）。

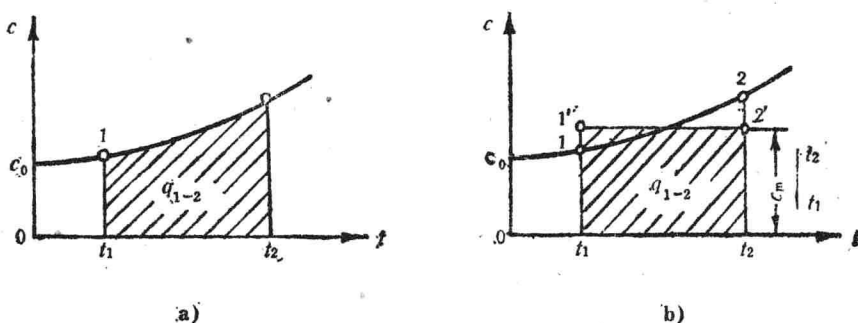


图1-5 真实比热与平均比热
a) $c-t$ 图; b) 平均比热

$$\text{即 } c_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1}$$

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \int_0^{t_2} f(t) dt - \int_0^{t_1} f(t) dt$$

故

$$q_{1-2} = c_m|_0^{t_2} t_2 - c_m|_0^{t_1} t_1 \quad (1-7)$$

所以，只要有了从 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 的各种理想气体的平均比热表（根据各种气体的 $c_{pm}|_0^t$ 平均等压摩尔比热表），则可以通过式 (1-7) 很方便地计算热量 q_{1-2} 。

(四) 定比热

在实际应用中，当温度变化不太大，或者在并不要求很精确的热量计算中，则常常把理想气体的比热近似的看作常量来处理。这时忽略了温度对比热的影响，而只按理想气体的原子数确定比热，称为“定比热”，见表 1-2。

定 比 热

表 1-2

	等容摩尔比热 C_v kJ/(kmol·K)	等压摩尔比热 C_p kJ/(kmol·K)
单原子气体	3×4.1868	5×4.1868
双原子气体	5×4.1868	7×4.1868
多原子气体	7×4.1868	9×4.1868

§1-2 热力学基本定律

一、热力学第一定律

热力学第一定律其实质是能量守恒定律在热力学系统中的应用。主要是说明机械能和热能在转换中的守恒。它可以表达为：“热能可以转化为数量相当的机械功，一定量的机械功也可以转化为数量相当的热”等等。

国际单位制统一规定，功 W 、热 Q 的单位都使用焦耳(J)。这时，

$$Q = W$$

为了应用热力学第一定律来研究热能与机械能之间的相互转换的规律，以数学式表示它们之间的关系，下面介绍两个基本概念。

(一)内能

内能就是工质内部气体分子运动的动能和由于分子间相互吸引所形成的位能的总和。比内能 u (J/kg) 是对 1kg 工质而言的。 m 千克工质的总内能 U 为：

$$U = mu \quad (\text{J})$$

分子热运动动能是温度 T 的函数，分子间的位能是比容 v 的函数。温度 T 、比容 v 都是工质的状态参数，则由它们所决定的内能 u 也是工质的状态参数，它的值只与状态有关。工质由状态 1 (内能 u_1) 变化到状态 2 (内能 u_2) 的内能变化量 $\Delta u = u_2 - u_1$ 只与工质的初终状态有关，而与工质由状态 1 到状态 2 所经历的过程性质无关。

根据理想气体的假设，其分子间没有引力，于是，理想气体分子间的位能为零，其内能 u 仅是温度的单值函数。 $u = f(T)$ 。而且只要工质初终状态的温度 T_1 、 T_2 确定时，不论其间经过什么过程，理想气体内能的变化 Δu 都相等。

$$\Delta u = u_2 - u_1 = f(T_2) - f(T_1) \quad (1-8)$$

(二)功和热量

功和热量都不是状态参数，它们与状态的变化以及系统由状态 1 变化到状态 2 所经历的过程有关。所以不能说系统在某一状态下有多少功或多少热量，只能说系统在某一过程中对外做了或从外界得到了多少功，从外界获得了或向外界放出了多少热量。功和热量可以通过系统状态变化过程来确定。

若将 1kg 工质封闭在气缸内进行一个过程，自外吸收热量 q ，并对外输出膨胀功 W 的情况，如图 1-6 所示。

设活塞截面积为 $A(\text{m}^2)$ ，当活塞在某一位置时，工质的压力为 $p(\text{Pa})$ ，其作用在活塞顶面上的力为 $pA(\text{N})$ ，活塞移动 dx 距离时，1kg 工质对活塞所做的微元功 dw 为：

$$dw = pAdx$$

而 Adx 即为 1kg 工质所占容积的增量 $Adx = dv$ ，因此：

$$dw = pdv \quad (1-9)$$

对过程 1-2，工质由状态 1 膨胀到状态 2 所作的膨胀功为：

$$W = \int_{v_1}^{v_2} pdv \quad (\text{J/kg}) \quad (1-10)$$

如果已知工质的初、终状态参数以及过程 1-2 的函数关系 $p = f(v)$ (过程方程式)，

则可求得工质的膨胀功 W ，其数值等于 $p-v$ 图上过程曲线 1-2 下面所包围的面积 $12v_2v_11$ 。

由此可见，膨胀功不仅与状态的改变有关，而且与状态变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质为 m 千克，其总容积为 $V = mv$ ，则膨胀功为：

$$W = mw = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot m dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (\text{J}) \quad (1-11)$$

在膨胀过程中，工质容积增大 $dV > 0$ ，膨胀功 W 为正值；在压缩过程中，工质容积减小 $dV < 0$ ，压缩功为负值。工质的膨胀功就是外界所得到的功，工质的压缩功就是外界所消耗的功。在实际过程中，由于工质不可能绝对平衡，而且也必然有摩擦损失存在，因此实际过程中外界所得到的功将小于膨胀功。外界所消耗的功将大于压缩功。

(三) 热力学第一定律数学式——能量平衡方程

封闭在气缸中的定量是闭口系统的典型例子，如图 1-7 所示。假定气缸中的工质是 1 千克，工质从状态 1 (p_1, v_1, T_1, u_1)，经历某一过程到达状态 2 (p_2, v_2, T_2, u_2)，过程中工质从外界吸收热量 q ，并对外作功 w 。根据能量转换和守恒定律，在这里必然是热量、功和内能三者的转换与守恒，即：

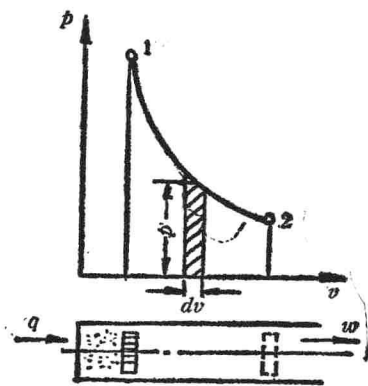


图1-7 能量平衡

气体，实际过程都适用。

式中： q 、 w 、 Δu 都是代数值，有正负之分，工程热力学中有统一的规定，见表1-3。

如果工质从状态 1 到状态 2 的变化是可逆过程，就可在 $p-v$ 图上用一条连续曲线表示。利用前述可逆膨胀功的计算方法代入以上三式，可以得到第一定律解析式：

$$q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-15)$$

$$dq = du + p dV \quad (1-16)$$

$$Q = \Delta U + \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-17)$$

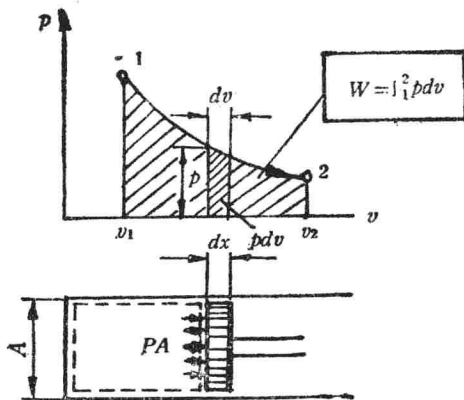


图1-6 膨胀功

$$q = u_2 - u_1 + w = \Delta u + w \quad (\text{J/kg}) \quad (1-12)$$

对 1 千克工质的微元过程有：

$$dq = du + dw \quad (\text{J/kg}) \quad (1-13)$$

对 m 千克工质来说，则有：

$$Q = \Delta U + W \quad (\text{J}) \quad (1-14)$$

在系统中，外界加给系统的热量 q ，一部分仍以热能的形式贮存于工质的内部，另一部分则以功的形式传给外界，转化为机械能。

以上能量平衡方程的三个公式，都是通过热力学第一定律的原则直接导出的，没有附加条件。因此，无论工质是理想气体，还是实际

正负号统一规定

表1-3

热 量 q	工质自外界吸热	+
	工质向外界放热	-
功 w	工质膨胀对外做功	+
	压缩工质消耗外功	-
内 能 增 量 Δu	工质内能增加	+
	工质内能减少	-

二、热力学第二定律

热力学第一定律说明了机械能与热能相互转换过程中的数量关系。但是满足这种等量关系的能量转换不是一定都能自发进行的，它们具有一定的方向性。例如两个不同温度的物体接触时，热量总是从高温物体传向低温物体，而不可能反向进行。机械能可以通过摩擦而全部转变为热能，但是热能却不能很方便地转变为机械能，它必须具备一定的补充条件。这些经验的归纳和总结就得出了热力学第二定律。

热力学第二定律有许多不同的阐述方式。但是尽管说法不同，其实质都是完全一致的。从内燃机热力学的研究出发，下面两种描述较为普遍。

第一种：从热量传递的角度出发，即热量不可能自发地不付代价地从一个低温的物体传至另一高温物体。然而对于制冷机来说，整个系统却是将热能自低温物体传至高温物体，不过这一过程的进行是花费了一定代价的，开动制冷机消耗了一定量的功，而这一部分功转变为热能就是其所花费的代价。

第二种：单热源的热机是不存在的，即在热力发动机中，工质从高温热源所得到的热量不可能全部转变为机械功，而只可能是其中一部分。另一部分热量则必须放给某一冷源。也就是说，在一个热力循环中，要使工质从热源获得的热能转变为机械功，则必须同时向冷源放出一部分热量。这就是热能转变为机械能，必须具备的补充条件。

通过工质的热力状态变化过程，可以把热能转化为机械能而做功。但是仅仅依靠任何一个过程都不可能连续不断地做功。为使连续做功成为可能，必须在工质膨胀做功后，经过某种压缩过程，使它回复到原来的状态，以便重新进行膨胀做功的过程。这种使工质经过一系列的状态变化，重新回复到原来状态的全部过程，就叫做一个“循环”。重复这个循环就能连续不断地把热能转变为机械能。

设1千克工质在热机中进行一个封闭循环，如图1-8，在 $p-v$ 图上，其中 $1a2$ 是工质的膨胀过程。为使工质连续做功，外界对工质做压缩功经过 $2b1$ 过程使工质回复到初始状态1，故工质在一个循环中的净功等于其膨胀功与压缩功之差；即等于 $p-v$ 图上循环所包围的面积：

$$\text{面积}1a2b1 = \text{面积}1a2v_2v_11 - \text{面积}1b2v_2v_11$$

$$\oint dw = \int_{1a2} p dv - \int_{2b1} p dv$$

显然，循环的净功是外界传入热能转化而来的。由热力学第一定律：