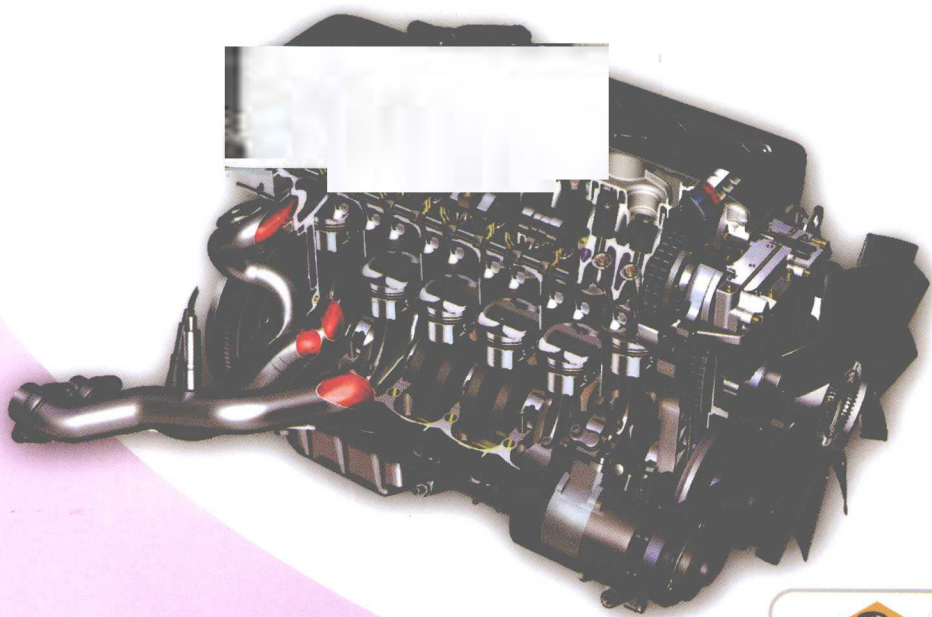


汽车发动机原理

普通高等教育交通类专业规划教材



吴明 任勇刚 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育交通类专业规划教材

汽车发动机原理

主 编 吴 明 任勇刚
副主编 邢世凯 付建国 李春荣
主 审 郭英男



机械工业出版社

本书系统地介绍了汽车发动机的工作原理、性能以及技术进展情况等。其主要内容包括：工程热力学基础、发动机的性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧、车用发动机废气涡轮增压、柴油机混合气的形成与燃烧、汽油机混合气的形成和燃烧、发动机电控技术、发动机特性和发动机的排放与噪声等。本书注重理论与实践的结合，加强了针对性与应用性，旨在培养学生的技术应用能力。

本书为高等学校车辆工程、交通运输以及相关专业的本科生专业课教材，也可供从事汽车以及汽车发动机设计、制造等方面工作的研究人员与工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车发动机原理/吴明, 任勇刚主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 11

普通高等教育交通类专业规划教材

ISBN 978-7-111-40364-7

I. ①汽… II. ①吴…②任… III. ①汽车-发动机-理论-高等学校-教材 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 266694 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 赵海青 责任编辑: 赵海青 版式设计: 霍永明

责任校对: 陈越 封面设计: 姚毅 责任印制: 张楠

北京华正印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.5 印张 · 328 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40364-7

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

社服务中心: (010) 88361066

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着汽车工业的发展，社会对汽车类人才的需求不断增加，设置“车辆工程”、“汽车服务工程”、“交通运输”等专业的院校越来越多。汽车人才的培养方案必须依据科学技术迅猛发展、学科交叉和专业淡化的大背景，注重拓宽理论基础和专业方向，突出创造能力和创新意识。为此，编者认真总结了近年来的课堂教学经验，对当代国内外汽车发动机在理论方面的新概念及工程实践方面的新技术进行合理筛选，力图以科学性、先进性、系统性和实用性为宗旨编写此书。

本书增加了“工程热力学基础”部分，从工程热力学角度分析了汽车发动机热功转换的基本规律、燃烧与传热基本原理。全书紧密结合发动机性能指标这一主线，通过分析发动机各工作过程中影响性能指标的诸多因素，从中找到提高汽车发动机整机性能的一般规律和基本途径。

为满足上述专业的教学需要，编者在教材编写中以加强针对性和应用性为原则，使知识结构脉络清楚，层次分明，突出本科特色。其特点：理论紧密联系汽车类专业实际，基本内容讲透，一般内容从简；反映当代科技发展水平与高新技术；采用国家最新的专业术语、实验规范、国家标准；尽力拓宽教材适应面，尽力做好与后续课程的衔接；每章后附复习思考题。

本书的编写人员有吴明、任勇刚、邢世凯、付建国、李春荣、王洪亮、陈霞、刘小芳、钟明利、初立东。

本书由吴明、任勇刚任主编，邢世凯、付建国、李春荣任副主编，吉林大学汽车工程学院博士生导师郭英男教授担任主审。郭教授在审稿过程中提出了大量的宝贵意见，在此表示衷心感谢！

编 者

目 录

前言

| | |
|-------------------------------|----|
| 第一章 工程热力学基础 | 1 |
| 第一节 工质的热力状态 | 1 |
| 第二节 热力学第一定律 | 3 |
| 第三节 气体的基本热力过程 | 7 |
| 第四节 热力学第二定律及卡诺循环 | 11 |
| 第五节 发动机的理想循环 | 13 |
| 复习思考题 | 18 |
| 第二章 发动机的性能指标 | 19 |
| 第一节 四冲程发动机的实际循环 | 19 |
| 第二节 发动机的指示指标 | 22 |
| 第三节 发动机的有效指标 | 24 |
| 第四节 机械损失与机械效率 | 26 |
| 第五节 提高发动机有效效率的途径 | 30 |
| 第六节 目前国内汽车发动机发展现状及未来趋势 | 35 |
| 复习思考题 | 38 |
| 第三章 发动机的换气过程 | 39 |
| 第一节 四冲程发动机的换气过程 | 39 |
| 第二节 四冲程发动机的充量系数 | 42 |
| 第三节 提高发动机充量系数的措施 | 46 |
| 第四节 二冲程发动机的换气过程 | 51 |
| 复习思考题 | 56 |
| 第四章 燃料与燃烧 | 57 |
| 第一节 发动机燃料及使用特性 | 57 |
| 第二节 燃烧热化学 | 65 |
| 第三节 燃烧的基本理论 | 67 |
| 复习思考题 | 72 |
| 第五章 车用发动机废气涡轮增压 | 73 |
| 第一节 发动机增压技术概述 | 73 |
| 第二节 废气涡轮增压器的基本结构及工作原理 | 76 |
| 第三节 废气涡轮增压系统的类型 | 80 |
| 第四节 废气涡轮增压对发动机性能的影响 | 81 |
| 第五节 汽油机增压 | 87 |
| 复习思考题 | 88 |
| 第六章 柴油机混合气的形成与燃烧 | 89 |
| 第一节 燃油喷射与雾化 | 89 |
| 第二节 柴油机燃烧过程 | 96 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 第三节 柴油机混合气形成和燃烧室 | 100 |
| 第四节 使用因素对燃烧过程的影响 | 110 |
| 复习思考题 | 113 |
| 第七章 汽油机混合气的形成和燃烧 | 114 |
| 第一节 汽油机的燃烧过程 | 114 |
| 第二节 影响燃烧过程的因素 | 120 |
| 第三节 汽油机燃烧室 | 123 |
| 复习思考题 | 132 |
| 第八章 发动机电控技术 | 133 |
| 第一节 柴油机电控喷射系统 | 133 |
| 第二节 汽油机电控喷射系统 | 145 |
| 复习思考题 | 161 |
| 第九章 发动机特性 | 162 |
| 第一节 发动机工况和性能指标分析式 | 162 |
| 第二节 发动机速度特性 | 165 |
| 第三节 发动机负荷特性 | 169 |
| 第四节 柴油机的调速特性 | 173 |
| 第五节 发动机万有特性 | 176 |
| 第六节 车用发动机的匹配 | 179 |
| 复习思考题 | 182 |
| 第十章 发动机的排放与噪声 | 184 |
| 第一节 发动机排放污染及防治 | 184 |
| 第二节 发动机噪声污染及防治 | 199 |
| 复习思考题 | 203 |
| 常用符号表 | 205 |
| 参考文献 | 207 |

第一章 工程热力学基础

热力学是研究热能性质及其转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个分支，它着重研究与热力工程有关的热能和机械能相互转换的规律。在阐明两条基本定律的基础上，分析热力工程中有关热力过程及热力循环，从理论上研究提高热功转换的有效途径。

本章仅就工程热力学基础知识作简要阐述，为学习汽车发动机原理提供必要的理论基础和分析计算方法。

第一节 工质的热力状态

热力学中把主要研究对象的物体总称为热力系统；把热力系统外面与热功转换过程有关的其他物体称外界；热力系统和外界的分界面称为边界。通常把实现热功转换的工作物质称为工质。把供给工质热量的高温物质称为高温热源；而把吸收工质放出热量的冷却介质或环境称为低温热源；热力系统通常就是由热力设备中的工质所组成，而高温热源、低温热源和其他物体等则组成外界。

若一个热力系统和外界只可能有能量（热能、机械功等）交换而无物质交换，称为闭口系统。若一个热力系统和外界既可能有能量交换，同时又有物质交换，称为开口系统。

一、工质的基本状态参数

热力学中把工质所处的某种宏观状况称为工质的热力状态。发动机依靠工质热能转换为机械能的过程，在宏观上表现为气体本身状态发生变化的过程。工质的热力状态常用物理量来描述，这些物理量称为状态参数。常用的状态参数有三个，即压力、温度和质量体积（比容），这三个可以测量的物理量称为基本状态参数。

1. 压力 p

气体对单位面积容器壁所施加的垂直作用力称为压力。按照分子运动论，气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量。压力的单位为 Pa，工程上常用 kPa 与 MPa。

容器内气体压力的大小有两种不同的表示方法：一种是指气体施于容器壁上压力的实际数值，称为绝对压力，符号为 P ；另一种是测量时压力计的读数，称为表压力，符号为 P_B 。

由图 1-1 可知，表压力是绝对压力高出于当时当地的大气压力 P_0 的数值。其关系式为

$$P = P_0 + P_B$$

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时，表压力为负值，仅取其数值，称为真空度，记作 P_C ，即

$$P = P_0 - P_C$$

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的，真空度的数值越大，说明越接近绝对真空。只

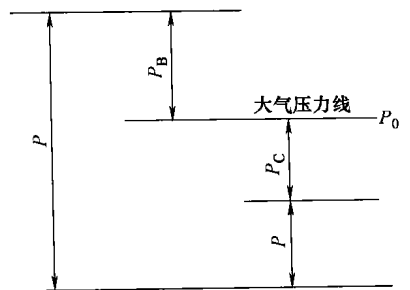


图 1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

2. 温度 T

温度表示气体冷热的程度。按照分子运动论，气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度，是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体的温度越高，表明气体分子的平均动能越大。

热力学温度 T 的单位为 K，是国际单位制中的基本单位，选取水的三相点温度为基本点温度，规定其温度为 273.16K，1K 等于水的三相点热力学温度的 1/273.16。国际单位制允许使用摄氏温度 t ，其关系式为

$$T = t + T_0$$

$$T_0 = 273.16\text{K}$$

在一般工程计算中，把 T_0 取作 273K 已足够精确。摄氏温度每一度间隔与热力学温度每一度间隔相等，但摄氏温度的零点比热力学温度的零点高 273.16K。热力学温度不可能有负值。

3. 质量体积 v

质量体积是单位质量的物质所占有的容积，即

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

式中 v ——质量体积， m^3/kg ；

V ——容积， m^3 ；

m ——质量， kg 。

质量体积的倒数称为密度。密度是指单位容积的物质所具有的质量。其计算公式为

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

式中 ρ ——密度， kg/m^3 。

二、理想气体的状态方程

实际气体分子本身具有体积，分子间存在相互作用力，分子持续不断地做无规则的热运动，分子数目庞大。因此，实际气体的热力性质的研究非常复杂，即压力 p 、质量体积 v 、温度 T 之间的关系一般比较复杂。但是，通过大量实验发现，当密度比较小，也就是质量体积较大的时候，处于平衡状态的气态物质的基本状态参数之间将近似的保持一种简单关系。为此，人们提出了理想气体的模型。

所谓理想气体，是假设在气体内部，其分子不占体积，分子间又没有吸引力的气体。在这两点假设条件下，气体分子的运动规律极大地简化了，分子两次碰撞之间为直线运动，且弹性碰撞无动能损失。对此简化后的物理模型，不但可以定性地分析气体某些热力现象，而且可以定量地导出状态参数间存在的简单函数关系。

在热力计算和分析中，常把空气、燃气和烟气等气体都近似地看做理想气体。因为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，气体之间的吸引力也很小。通常把实际气体近似地看做理想气体来进行各种热力计算，其结果极其相似。所以，对理想气体性质的研究，在理论上和实际上都是很重要的。

根据分子运动论和对理想气体的假定，结合实验所得的一些气体定律，并综合表示成理

想气体状态方程式（或称克拉贝隆方程式）。对于 1kg 理想气体，其状态方程为

$$pv = RT$$

对于 m kg 理想气体，总容积 $V = mv$ ，其状态方程为

$$pV = mRT$$

式中 R ——气体常数。 R 的数值决定于气体的种类， $J/(kg \cdot K)$ 。

对于 1mol（摩尔）质量的理想气体，其状态方程为

$$R_m = \frac{pV_m}{T}$$

式中 R_m ——通用气体常数， $J/(mol \cdot K)$ ，对于任何理想气体，数值相同；

V_m ——摩尔体积， m^3/mol 。

理想气体状态方程式反映了理想气体三个基本状态参数间的内在联系， $F(p, v, T) = 0$ ，只要知道其中两个参数，就可以通过该方程求出第三个参数。

三、工质的比热容

所谓比热容，就是单位量的物质温度升高（或降低）1K 时所吸收（或放出）的热量。用 c 表示，单位为 $J/(kg \cdot K)$ ，其定义式为

$$c = \frac{dq}{dT} \text{ 或 } c = \frac{dq}{dt}$$

1mol 物质的热容量为摩尔热容，以 C_m 表示，单位为 $J/(mol \cdot K)$ 。标准状态下 $1m^3$ 物质的热容称为体积热容，以 C' 表示，单位为 $J/(m^3 \cdot K)$ ，三者之间的关系为

$$C_m = Mc = 0.0224141C'$$

式中 M ——气体的分子量。

四、工质的内能

内能就是工质内部分子和原子运动的动能和分子间的位能的总和。根据气体分子运动学说，分子在不断地作不规则的平移运动，这种运动的动能是温度的函数。如果是多原子分子，则还作旋转运动与振动，这些能量也是温度的函数。此外，分子之间有作用力存在，因此分子间还具有位能，它决定于分子间的平均距离即决定于质量体积。

在工程热力学中，工质的内能用 u 表示，单位是 J/kg 或 kJ/kg 。根据分子运动论，分子的动能与工质的温度有关；分子间的位能主要与分子间的距离有关，即工质占据的体积有关。因此，工质的内能是温度和体积的函数。则有 $u = f(T, V)$ ；对理想气体，分子间无吸引力，分子位能不存在，其内能仅有气体内部动能，因此理想气体的内能是温度的单值函数。则有

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

第二节 热力学第一定律

一、热力过程及其功量

热力过程是指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。热力系统从一个平衡（均匀）状态连续经历一系列（无数个）平衡的中间状态过渡到另一个平

衡状态，这样的过程称为内平衡过程。否则便是内不平衡过程。在热力学中，常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图，例如以压力 p 为纵坐标、质量体积 v 为横坐标组成的坐标图（简称压容图）来进行热力学分析，如图 1-2a 所示。

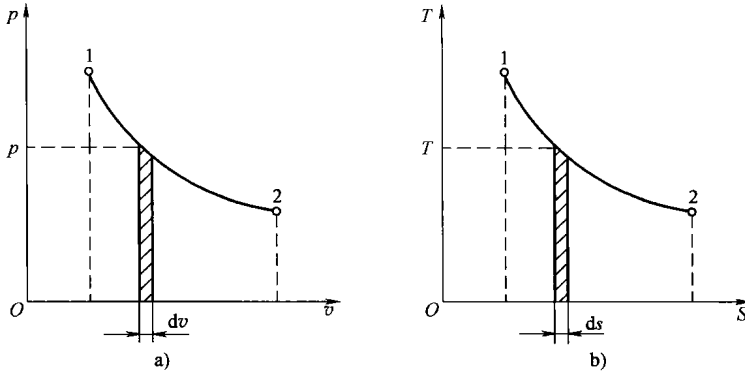


图 1-2 可逆过程的 p - v 图和 T - S 图

图中 1、2 分别代表 (p_1, v_1) 、 (p_2, v_2) 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态；1-2 曲线代表一个内平衡过程。如果工质由状态 1 变化到状态 2 所经历的不是一个内平衡过程，则该过程无法在 p - v 图上表示，仅可标出 1、2 两个平衡点。

热量 q 与功量 W 一样同是过程量，它们有同一性，对比起来分析，系统与外界发生热量交换时，起动力作用的是温度 T ，没有温差就不可能发生实际的传热，在极限的情况下，系统与外界发生热量交换的温差为无穷小时，则属于可逆的传热过程。显而易见，有一个状态参数，它的变化可以判断热量的正负，并且与功量相仿可以构成类似的表达式和坐标图，并在类似的坐标图上用一块面积来图示热量。这个状态参数就是熵。

熵是一个导出的状态参数，它的定义式为

$$ds = dq/T$$

式中 dq ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量；

T ——可逆过程时的温度（可逆过程中工质与外界的温度随时间保持相等）。

熵的定义：熵的增量等于系统在可逆过程中交换的热量除以传热时的绝热温度所得的商。

质量为 1（单位为 kg）的工质的熵 s 的单位是 $(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$ 。质量为 m （单位为 kg）的工质的熵 S 的单位是 (J/k) ， $S = ms$ 。

同功量的图示相仿，也可用两个独立的状态参数 T 、 S 构成的状态图来表示热量。在 T - S 图上的一点表示一个平衡状态，一条曲线表示一个可逆过程，如图 1-2b 的曲线 1-2。

$$dq = Tds$$

$$q = \int_1^2 Tds = \text{面积 } 12S_2S_1$$

因此 T - S 图上曲线 1-2 下的面积表示该过程中的传热量 q 的大小，故 T - S 图又称为“示热图”，它在热工分析中有重要的功用。

对于质量为 m （单位为 kg）的工质的热量 Q ，可按下列式计算：

$$Q = m \int_1^2 T ds = \int_1^2 T dS$$

可逆过程：假设系统经历平衡过程 1—2，由状态 1 变化到状态 2，并对外做膨胀功 W ，如图 1-2 所示。如果外界给以相同大小的压缩功 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，即没有得到功，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。

二、热力学第一定律

热力学第一定律的实质就是能量守恒及转换定律用于热能和其他能量形态转换关系时的表述。能量守恒与转换定律是自然界的一个基本规律。它指出：自然界中一切物质都具有能量。能量既不可能被创造，也不可能被消灭，只能从一种形式转变为另一种形式。转换中能量的总量保持不变。这是长期以来人们生产实践的总结，而不是从任何其他的定律导出的，而且在生产和科学的实践中，它还在不断地得到证实和丰富。热力学第一定律说明：热能作为一种能量形态，可以和其他能量形态相互转换，转换中能量的总量守恒。

在各种能量转换中，热能和机械能的转换在人类生产的历史上始终受到极大的关注，要想得到机械能就必须花费热能或其他能量。那种幻想不花费能量就能产生机械能的企图都不可避免地归于失败。因而热力学第一定律也常表述为：不花费能量就可以产生功的第一类永动机是不可能制造成的。

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力系统中的具体应用。它主要表达：工质经历受热做功的热力过程时，工质从外界接受的热量、工质因受热膨胀而对外界所做出的功、同时工质内部储存或付出的能量三者之间必须保持收支上的平衡，否则就不符合能量守恒的原则。因此在介绍热力学第一定律解析式之前，对功、热量作必要的介绍。

1. 功

图 1-3 表示质量为 1（单位为 kg）的工质封闭在气缸内进行一个可逆过程的膨胀做功情况。设活塞截面面积为 A (m^2)，工质作用在活塞上的力为 pA ，活塞被推进一微小距离 dx ，在这期间，工质的膨胀极小，工质的压力近乎不变，因而工质对活塞做的功为

$$dw = pAdx = pdv$$

对可逆过程 1—2，工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

如果已知工质的初、终态参数，以及过程 1—2 的函数关系 $p=f(v)$ ，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。因此压容图也称为示功图。由图可见，膨胀功不仅与状态改变有关。而且与状态

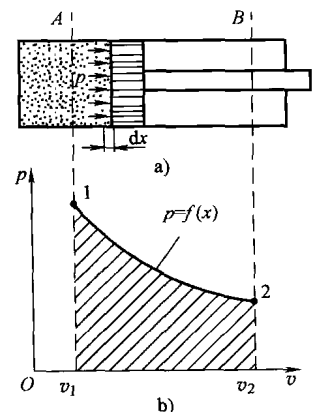


图 1-3 气体在气缸中所做的功

变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质为 m (单位为 kg), 其总容积为 $V = mv$, 膨胀功为

$$W = mw \int_{v_1}^{v_2} pmdv = \int_{v_1}^{v_2} p dV$$

当工质不是膨胀, 而是受到外界压缩时, 则是外界对工质做功。这时 dV 成为负值, 算出的 W 也是负值, 负的膨胀功实际上表明工质接受了外界的压缩功。

2. 热量

热量和功一样不是热力状态的参数, 而是工质状态改变时对外效应, 即传递中的能量。因此不能说: “工质在该状态下具有多少热量。”

热量和功的根本区别在于: 功是两个物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量; 热量则是两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

按习惯, 规定外界加给系统的热量为正, 而系统放给外界的热量为负。国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳 (J)。

三、能量平衡方程

热力学第一定律的能量方程就是系统变化过程中的能量平衡方程式, 是分析状态变化过程的根本方程式。

在实际热力学过程中, 许多系统都是闭口系统, 图 1-4 所示的气缸活塞系统是一个典型的闭口系统。

通常该系统的宏观动能和宏观位能均无变化, 系统能量的增量仅为内能增量 ΔU 。设工质由平衡状态 1 变化到平衡状态 2 的状态变化过程中从外界吸取的热量为 Q , 对外所做的膨胀功为 W , 则该闭口系统的热力学第一定律表达式为

$$Q - W = \Delta U$$

即

$$Q = \Delta U + W$$

对于单位质量的工质, 有

$$q = \Delta u + w$$

对于微元过程, 有

$$dq = du + dw$$

上述四个公式称为闭口系统能量方程式。它们说明: 闭口系统在热力过程中从外界接受热量, 一部分用于增加系统的内能, 另一部分用于对外界做功。

上述公式中各项的正负号规定: 系统吸热为正, 放热为负; 系统对外做功为正, 外界对系统做功为负。

在导出上述公式时, 没有对过程进行的条件作任何规定, 故公式既可用于准静态过程, 又可用于非准静态过程。但在用于非准静态过程时, 为了能确定初始状态及终了状态下系统的热力学能, 至少这两状态应该是平衡状态。

对于可逆过程 (或准静态过程) 为

$$W = \int_1^2 p dV$$

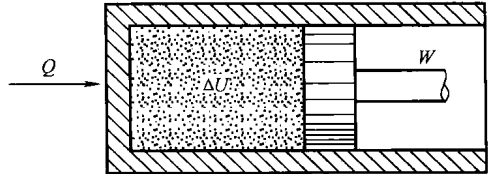


图 1-4 闭口系统示意图

或

$$w = \int_1^2 p dv$$

第三节 气体的基本热力过程

发动机的工作是靠热力循环进行的，每个热力循环都是由相当复杂的热力过程所构成的。为了分析研究的方便，可以近似地利用几个特殊的热力过程来代替那些复杂的过程。在工程热力学中，主要典型的热力过程有定容过程、定压过程、定温过程、绝热过程和多变过程。

研究热力过程的任务是确定工质在过程中的变化规律，即求得过程方程式，给出过程曲线，并计算其过程热量、功量及内能的变化，写出过程中初态、终态参数的关系式。

一、定容过程

工质的容积保持不变的过程称为定容过程。一定量的气体在刚性密闭容器中加热或冷却时质量体积保持不变。

1. 过程方程式

定容过程方程式为

$$v = \text{常数}$$

2. 基本状态参数间关系

根据过程方程式和理想气体状态方程式，定容过程初态、终态基本状态参数间的关系为

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 \\ \frac{T_2}{T_1} &= \frac{p_2}{p_1} \end{aligned}$$

3. 功量和热量计算

因为理想气体的内能温度的单值函数，所以理想气体所经历的任何过程都有

$$\Delta u = \int_1^2 c_v dT$$

由 $v = \text{常数}$ ， $dv = 0$ ，则定容过程中气体的膨胀功为零，即

$$w = \int_1^2 p dv = 0$$

定容过程中工质吸入（或放出）的热量可根据热力学第一定律第一解析式得出

$$q = \Delta u + w = \Delta u + 0 = c_v \Delta T = c_v (T_2 - T_1)$$

4. 定容过程在 $p-v$ 图上与 $T-S$ 图上的表示

定容过程在 $p-v$ 图上为一条垂直于 v 轴的直线，如图 1-5 所示。1→2 为定容吸热过程，1→2' 为定容放热过程。在 $T-S$ 图上，过程曲线是一条指数函数曲线。

二、定压过程

工质压力保持不变的过程称为定压过程。

1. 过程方程式

定压过程方程式为

$$p = \text{常数}$$

2. 基本状态参数间的关系

根据过程方程式及理想气体状态方程式，定压过程初态、终态基本状态参数间的关系为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 \\ \frac{T_2}{T_1} &= \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

3. 功量和热量计算

由于 $p = \text{常数}$ ，所以定压过程对外做的膨胀功为

$$w = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1)$$

定压过程供给的热量为

$$q = c_p \Delta T = c_p (T_2 - T_1)$$

根据热力学第一定律 $q = \Delta u + w$ 及理想气体状态方程式 $pv = RT$ ，经整理，得

$$c_p = c_v + R$$

4. 定压过程在 $p-v$ 图上与 $T-S$ 图上的表示

如图 1-6 所示，定压过程线在 $p-v$ 图上为一平行于 v 轴的直线。在 $T-S$ 图上，过程曲线也是一条指数函数曲线，对于定压过程，由于理想气体 $c_p > c_v$ ，所以在 $T-S$ 图上，定容线斜率大于定压线斜率，过同一状态点的定压线较定容线平坦。

$1 \rightarrow 2$ 为工质吸收的热量用于内能的增加和对外输出功； $1 \rightarrow 2'$ 过程为放出的热量来自内能的减少和消耗外功。

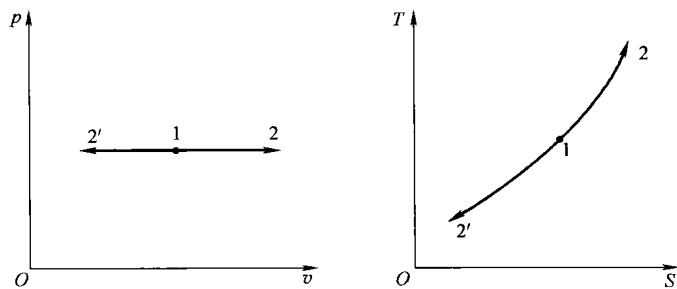


图 1-6 定压过程

三、定温过程

工质温度保持不变的过程称为定温过程。

1. 过程方程式

定温过程方程式为

$$pv = \text{定值}$$

2. 基本状态参数间关系

根据过程方程式和理想气体状态方程式，定温过程初态、终态基本状态参数间的关系为

$$T_1 = T_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

3. 功量和热量计算

根据过程方程式，定温过程的膨胀功为

$$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{RT}{v} dv = RT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

4. 定温过程在 $p-v$ 图与 $T-S$

图上的表示

如图 1-7 所示，在 $p-v$ 图上定温过程为一等边双曲线，在 $T-S$ 图上，定温过程为一水平线。其中， $1 \rightarrow 2$ 代表定温吸热过程， $1 \rightarrow 2'$ 代表定温放热过程。

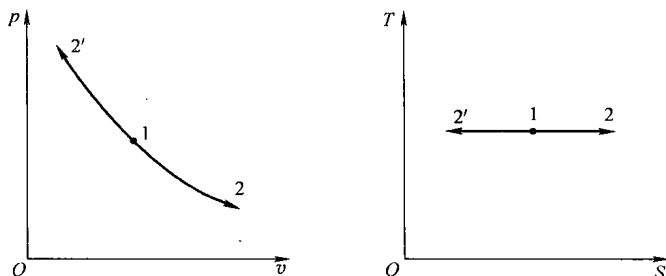


图 1-7 定温过程

四、绝热过程

系统和外界间不发生热量交换时，系统状态变化所经历的过程称为绝热过程。

当绝热过程是没有功耗散现象的准静态过程时，有 $dq = 0$ 。

即该过程为定熵过程，绝热可逆过程的熵保持不变，称为定熵过程。

1. 过程方程式

绝热过程的特征为 $dq = 0$ ， $q = 0$ 。对于可逆绝热过程，由热力学第一定律得

$$dq = du + dw = 0$$

而 $dv = c_v dT$ ， $dw = p dv$ ，所以 $c_v dT + p dv = 0$ ，而 $T = \frac{pv}{R}$ 所以

$$c_v d\left(\frac{pv}{R}\right) + p dv = 0; \text{ 整理后得 } \frac{c_v + R}{c_v} \cdot \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0, \text{ 而 } \frac{c_v + R}{c_v} = k, \text{ 其中 } k \text{ 为等熵指数。}$$

所以 $k \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$ ；积分后得 $k \ln v + \ln p = \text{常数}$ ，即 $\ln pv^k = \text{常数}$ 。

$$pv^k = \text{常数}$$

2. 基本状态参数间关系

根据过程方程式和理想气体状态方程式，初态、终态基本状态参数间的关系为

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

3. 功量和热量计算

对于绝热过程， $q = 0$ ，根据热力学第一定律，过程的膨胀功为

$$w = -\Delta u = u_1 - u_2$$

热量交换为

$$q = 0$$

内能变化为

$$\Delta u = C_v \Delta T = c_v (T_2 - T_1)$$

4. 绝热过程在 $p-v$ 图与 $T-S$ 图上的表示

从过程方程式 $pv^k = \text{定值}$ ，可以看出，在 $p-v$ 图上，绝热过程线为一高次双曲线，在 $T-S$ 图上，绝热过程线为一垂直于横坐标的直线，如图 1-8 所示，其中， $1 \rightarrow 2$ 代表绝热膨胀， $1 \rightarrow 2'$ 代表绝热压缩。

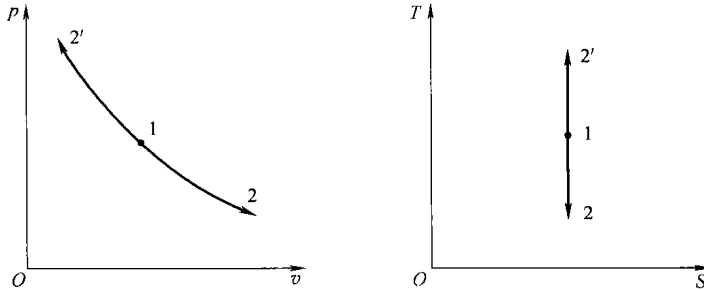


图 1-8 绝热过程

五、多变过程

1. 多变过程的定义及过程方程式

前面讨论的四种典型热力过程，在过程中均有工质某一状态参数保持不变或者与外界无热量交换。而在实际热机中，工质的状态参数都有显著变化，并且与外界有热量交换。这时它们不能简化为上述四种典型热力过程。通过研究发现，许多过程可以近似地用下面的关系式描述：

$$pv^n = \text{定值}$$

式中 n ——多变指数，理论上 n 可以是 $-\infty \sim +\infty$ 的任何一个实数。

满足这一规律的过程就称为多变过程，上式即为多变过程的过程方程式。

不同的多变过程，具有不同的 n 值，多变过程可以有无穷多种。当多变指数为某些特定的值时，多变过程便表现为相应的典型热力过程：

- (1) 当 $n=0$ 时， $p = \text{定值}$ ，为定压过程。
- (2) 当 $n=1$ 时， $pv = \text{定值}$ ，为定温过程。
- (3) 当 $n=k$ 时， $pv^n = \text{定值}$ ，为绝热过程。
- (4) 当 $n = \pm \infty$ 时， $v = \text{定值}$ ，为定容过程。

2. 多变过程中状态参数的变化规律

比较多变过程的过程方程式与绝热过程的过程方程式，可以发现，两方程的形式相同，所不同的是指数，因此只要将绝热指数 k 换成多变指数 n ，绝热过程的初态、终态关系式就可用于多变过程。即

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$$

3. 多变过程在 $p-v$ 图与 $T-S$ 图上的表示

在 $p-v$ 图与 $T-S$ 图上, 从同一初态点出发画出四种基本热力过程的过程线, 如图 1-9 所示。然后通过比较过程线的斜率, 可以看出多变过程线的分布规律。

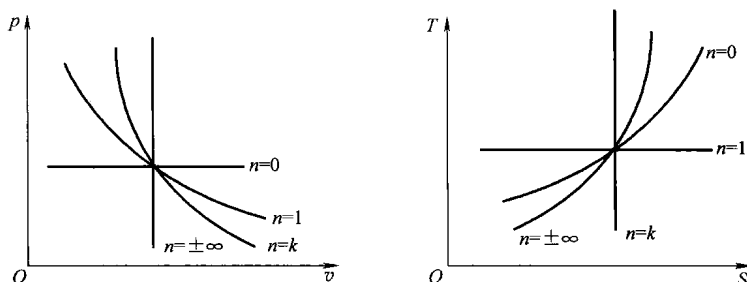


图 1-9 多变过程

在 $p-v$ 图上多变过程线的分布规律为: 从定容线出发, n 由 $-\infty \rightarrow 0 \rightarrow +\infty$, 按顺时针方向递增。

为了分析多变过程的热量转换和交换, 需要确定过程中的功和热量的正负值。这些可根据多变过程和四条典型过程线的相对位置来判断。

膨胀功的正负是以定容线为分界的。在 $p-v$ 图上, 过同一初态点的多变过程, 若过程线位于定容线右侧, 则 $w > 0$; 反之 $w < 0$ 。在 $T-S$ 图上, 若过程线位于定容线右下方, 则 $w > 0$ 。

热量 q 的正负是以绝热线为分界的。在 $p-v$ 图上, 过同一初态点的多变过程, 若过程线位于绝热线的右上方, 则 $q > 0$; 过程线位于绝热线的左下方, $q < 0$ 。

由于理想气体的内能是温度的单值函数, 所以, Δu 的正负取决于 ΔT 的正负。 ΔT 的正负是以定温线为分界的。在 $p-v$ 图上, 过同一初态点的多变过程, 若过程线位于等温线右上方, 则 $\Delta T > 0$, 即 $\Delta u > 0$, 若过程线位于定温线上方, 则 $\Delta T > 0$; 反之 $\Delta T < 0$ 。

第四节 热力学第二定律及卡诺循环

一、热力循环及其热效率

1. 热力循环

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。但仅仅依靠任何一个过程, 都不可能连续不断地做功。为了连续不断地将热转换为功, 必须在工质膨胀做功以后, 经过某种压缩过程, 使它回复到初始状态, 以便重新膨胀做功。这种使工质经过一系列变化, 又回到初始状态的全部过程, 称为热力循环。如图 1-10 所示的 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ 过程就形成了一个热力循环。

热力循环可分为正向循环和逆向循环。把热能

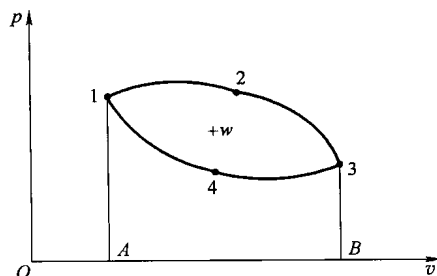


图 1-10 热力循环图