



全国高等院校“十三五”创新型规划教材  
QUANGUO GAODENG YUANXIAO SHISANWU CHUANGXINXING GUIHUA JIAOCAI

主编 ○ 蒋汪萍

FADONGJI

YUANLI

# 发动机 原理



西南交通大学出版社

全国高等院校“十三五”创新型规划教材

# 发动机原理

主 编 蒋汪萍

副主编 宰文洁 齐 芳 杨万福

参 编 冯 理 高金玲 杜妮丝

曾志娥 李小燕

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 ( C I P ) 数据

发动机原理 / 蒋汪萍主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2017.5

全国高等院校“十三五”创新型规划教材

ISBN 978-7-5643-5376-6

I. ①发… II. ①蒋… 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 (2017) 第 074725 号

全国高等院校“十三五”创新型规划教材

发动机原理

主 编 / 蒋汪萍

责任编辑 / 孟苏成

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 15.25 字数 342 千

版次 2017 年 5 月第 1 版 印次 2017 年 5 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-5376-6

定价 38.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前 言

本书共分为 10 章，主要内容包括：工程热力学基础、发动机的性能、发动机的换气过程、发动机增压、燃烧学基础、柴油机混合气的形成与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、发动机的排放与噪声、发动机的特性及车用发动机的发展趋势。本书可以作为高等院校车辆工程及相关专业的教材，也可作为汽车类工程技术人员的参考书。

本书由武汉华夏理工学院蒋汪洋担任主编，参加编写的有：李小燕（第 1 章）、齐芳（第 2 章）、蒋汪洋（第 3、9、10 章）、高金玲（第 4 章）、杜妮丝（第 5 章）、李文洁（第 6 章）、曾志娥（第 7 章）、冯理（第 8 章）。全书由蒋汪洋统稿，武汉理工大学杨万福教授审阅。

在此特别感谢本人所在单位武汉华夏理工学院的大力支持。由于编者水平有限，书中不妥或疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

蒋汪洋

2017 年 2 月

## 目 录

第 1 章 工程热力学基础	1
1.1 气体的热力性质	1
1.2 热力学第一定律	6
1.3 热力过程分析	12
1.4 热力学第二定律	18
思考题	22
第 2 章 发动机的性能	23
2.1 发动机的理论循环	23
2.2 发动机实际工作循环	29
2.3 发动机的指示指标	35
2.4 发动机的有效指标	39
2.5 机械损失与机械效率	41
2.6 发动机技术的发展	46
思考题	49
第 3 章 发动机的换气过程	50
3.1 四冲程发动机的换气过程	50
3.2 四冲程发动机的充气效率	54
3.3 影响充气效率的因素	54
3.4 提高充气效率的措施	58
思考题	63
第 4 章 汽车发动机增压	64
4.1 发动机增压的基本方法与原理	64
4.2 汽油机增压	67
4.3 机械增压	68
4.4 涡轮增压	70
思考题	77
第 5 章 燃烧学基础	78
5.1 发动机的常用燃料	78

5.2 燃料燃烧的特点 .....	89
思考题 .....	94
第6章 柴油机混合气的形成与燃烧 .....	95
6.1 电控柴油机概述 .....	95
6.2 柴油机混合气的形成和燃烧室 .....	105
6.3 柴油机燃烧与放热 .....	117
6.4 燃烧过程的优化 .....	125
思考题 .....	130
第7章 汽油机混合气的形成与燃烧 .....	131
7.1 汽油机混合气的形成 .....	131
7.2 汽油机的燃烧过程 .....	136
7.3 汽油机的燃烧室 .....	147
思考题 .....	157
第8章 发动机的排放与噪声 .....	158
8.1 发动机有害排放物的生成 .....	158
8.2 影响汽油机排放物生成的主要因素及控制方法 .....	169
8.3 影响柴油机排放物生成的主要因素及控制方法 .....	178
8.4 发动机排放标准 .....	187
8.5 发动机噪声控制 .....	193
思考题 .....	198
第9章 发动机的特性 .....	199
9.1 发动机的基本特性及工况 .....	199
9.2 发动机的负荷特性 .....	200
9.3 发动机的速度特性 .....	203
9.4 柴油机的调速特性 .....	207
9.5 发动机的转矩适应性 .....	210
9.6 发动机的万有特性 .....	212
9.7 发动机试验 .....	215
思考题 .....	224
第10章 车用发动机的发展趋势 .....	225
10.1 电控技术的发展 .....	225
10.2 电控技术在汽油机应用的功能扩展 .....	227
10.3 电控技术在柴油机上的应用 .....	232
10.4 混合动力驱动技术 .....	232
思考题 .....	235
参考文献 .....	236

# 第 1 章 工程热力学基础

热力学是一门研究物质的能量、能量传递和转换以及能量与物质性质之间转换规律的科学。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及其工程应用。

## 1.1 气体的热力性质

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”。热机的运转是依靠气态工质在特定的条件下不断地改变它的热力状态（简称状态），执行某一具体的热工转换过程来实现的。汽车发动机的工质是气体（包括空气、燃气）。因为气体具有较好的流动性和膨胀性，便于快速引进热机，做功以后又能迅速排出热机，在相同压差或温差下，其膨胀比最大，因而能够更有效地做功。同时，由于气体的热力性质简单，可以简化为理想气体，所以我们仅讨论理想气体的性质。

### 1.1.1 热力系统

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为外界；把热力系统和外界的分界面称为边界；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。热力系统通常是由热力设备中的工质组成，而高温热源、低温热源和其他物体等组成外界。

与外界只有能量交换而无质量交换的系统称为闭口系统。内燃机在气门全部关闭后，其气缸中的气体可以看作是闭口系统。与外界既有能量交换又有质量交换的系统称为开口系统，如管道、鼓风机和水泵等，如图 1-1 所示。与外界没有热量交换的系统称

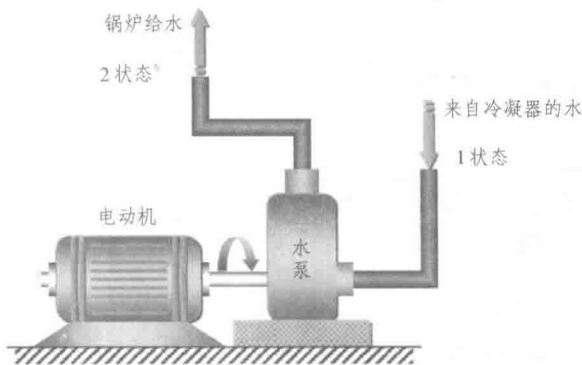


图 1-1 开口热力系统水泵示意图

为绝热系统，反之称为换热系统。与外界既无能量交换又无质量交换的系统，称之为孤立系统。若系统与外界进行热量交换，而本身温度不发生变化，则这种系统称为热源。

## 1.1.2 基本状态参数

热力学中把工质所处的某种宏观状态称为工质的热力状态。常用的状态参数主要有 6 个，即温度  $T$ 、压力  $p$ 、比容积  $v$ 、内能  $U$ 、焓  $H$  和熵  $S$ 。其中温度  $T$ 、压力  $p$  和比容积  $v$  可以直接用仪表测量，且其物理意义容易被理解，所以称为描述工质状态最常用的基本状态参数。

### 1. 温度 $T$

温度表示气体的冷热程度。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（旧称绝对温度）是国际单位制（SI）中的基本温度，单位为 K。选取水的三相点温度为基本定点温度，规定其温度为 273.15 K。1 K 等于水的三相点热力学温度的 1/273.15。SI 允许使用摄氏温度  $t$ ，并定义

$$t = T - T_0 \quad (1-1)$$

式中， $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ，在一般工程计算中，把  $T_0$  取作 273 K 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 273.15 K。热力学温度不可能有负值。

必须指出，只有热力学温度才是状态参数。

### 2. 气压 $p$

气体对单位面积容器壁所施加的垂直作用力称为气体压力  $p$ 。按分子运动论，气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量。压力单位为 Pa 或  $\text{N/m}^2$ ，工程上常用 kPa 和 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  $p_B$ 。

如图 1-2 所示，表压力是绝对压力高出当地大气压力  $p_0$  的数值。其关系式为

$$p = p_0 + p_B \quad (1-2)$$

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

$$p = p_0 - p_C \quad (1-3)$$

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。显然，只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。



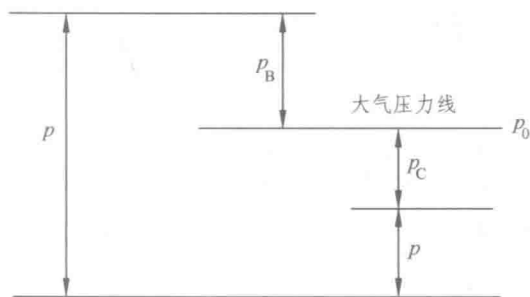


图 1-2 表压力、真空度与绝对压力的关系

### 3. 比容积

比容积是单位质量的物质所占的体积，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ ，即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

式中  $v$ ——比容积；

$m$ ——质量；

$V$ ——体积。

比容积的倒数为密度。密度是指单位容积的物质所具有的质量。其计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

式中  $\rho$ ——密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

#### 1.1.3 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，且分子数目庞大。因此，实际气体的热力性质的研究非常复杂，即压力、温度和比容积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，也就是比体积比较大的时候，处于平衡状态的气态物质的基本状态参数之间将近似地保持一种简单关系。为此，提出了理想气体的模型。

所谓理想气体，就是假设气体内部分子不占有体积，分子间没有吸引力，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、烟气等气体近似地看作理想气体，因为气体分子间的平均距离要比固体和液体大得多，所以，气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多，气体分子间的相互吸引力也很小。通常把实际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。所以，对理想气体性质的研究在理论上和实际应用中都很重要。

根据分子运动论和理想气体的假定，结合试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。对于  $1 \text{ kg}$  理想气体，其状态方程为

$$pv = RT \quad (1-6)$$

对于  $m$  kg 理想气体, 其体积  $V = mv$ , 其状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-7)$$

式中  $R$  —— 气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 它的数值取决于气体的种类。

对于 1 千摩尔 ( $\text{kmol}$ ) 理想气体, 其质量为  $\mu$  kg ( $\mu$  为其相对分子质量), 其体积为  $\mu v = V_m$  ( $\text{m}^3/\text{kmol}$ ), 按式 (1-7) 可以得出 1  $\text{kmol}$  理想气体的状态方程为

$$p\mu v = \mu RT \quad (1-8)$$

设  $\mu R = R_m$ , 即

$$pV_m = R_m T \quad (1-9)$$

根据式 (1-9) 可得

$$R_m = \mu R = \frac{pV_m}{T} \quad (1-10)$$

根据阿伏伽德罗定律可得同温度同气压下, 相同体积的任何气体都具有相同数目的分子。因此, 在同温同压下任何气体的千摩尔体积相等。在物理标准状况条件下, 千摩尔体积气体  $V_m$  的数值等于  $22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ , 故对于任何理想气体  $R_m$  的数值都相同, 因此将  $R_m$  称为通用气体常数, 将  $p_0$ 、 $T_0$ 、 $V_m$  代入式 (1-10) 可得

$$R_m = 8\,314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

或

$$R = \frac{8\,314.3}{\mu} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-11)$$

理想气体状态方程式反映了理想气体 3 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。

#### 1.1.4 工质的比热容

在热力工程中, 热量计算常用到比热容。工质的比热容就是单位量的物质当单位温度变化时所吸收或放出的热量。用符号  $c$  表示比热容, 根据定义有

$$c = \frac{dq}{dT} \quad \text{或} \quad c = \frac{dq}{dt} \quad (1-12)$$

式中  $dq$  —— 某工质在某一状态下温度变化  $dT$  所吸收或放出的热量,  $\text{kJ}$  或  $\text{J}$ 。

##### 1. 比热容与物质单位的关系

因为工质的计量单位可用  $\text{kg}$ 、 $\text{kmol}$ 、 $\text{m}^3$  表示, 所以工质的比热容有以下 3 种:

比质量热容:  $c$ , 单位:  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

比摩尔热容： $c_m$ ，单位： $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ；

比容积热容： $c'$ ，单位： $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

## 2. 比定压热容和比定容热容

气体在压力不变或体积不变的情况下被加热时的比热容，分别叫比定压热容和比定容热容，通常用脚标  $p$  和  $V$  来标注。如比定压热容记作  $c_p$  [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]，比定容热容为  $c_V$  [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ]，而比定压千摩尔热容记作  $c_{p,m}$  [ $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ]，比定容千摩尔热容为  $c_{V,m}$  [ $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ]，等等。

可以定义比热容比为

$$\kappa = \frac{c_{p,m}}{c_{V,m}} = \frac{\mu c_p}{\mu c_V} \quad (1-13)$$

比热容比  $\kappa$  又称等熵指数，它在工程热力学中有很重要的应用，以后会经常用到。

气体在定压下受热时，由于在温度升高的同时，还要克服外界抵抗力而膨胀做功，所以同样温度升高  $1^\circ\text{C}$ ，比在定容下受热时需要更多的热量。实验表明，理想气体的比定压热容值和比定容热容值的差是一个常数，即梅耶公式：

$$c_{p,m} - c_{V,m} = R_m \quad (1-14)$$

$$R_m = 8.3143 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \quad (1-15)$$

## 3. 定比热容

在实际应用中，温度变化不大或不要求很精确的计算时，常忽略温度的影响而把理想气体的比热容当作常量，只按理想气体的原子数确定比热容，称为定比热容，如表 1-1 所示。

表 1-1 理想气体的定值比摩尔热容和比热容比

	单原子气体	双原子气体	多原子气体
$c_{V,m}$	$3/2R_m$	$5/2R_m$	$7/2R_m$
$c_{p,m}$	$5/2R_m$	$7/2R_m$	$9/2R_m$
$\kappa$	1.66	1.40	1.29

### 1.1.5 热力过程

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  $p$  为纵坐标， $V$  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 1-3 所示。图中  $a$ 、 $b$  两点分别代表  $p$ 、 $V$  的两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态。曲线代表一个内平衡过程。

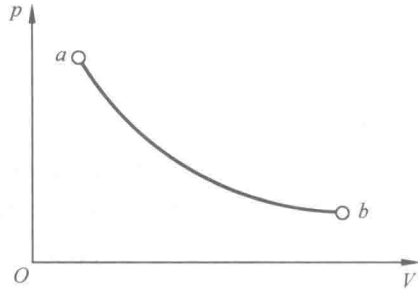


图 1-3  $p$ - $V$  坐标图

假设系统经历平衡过程  $a-b$ , 由状态  $a$  变化到状态  $b$ , 并对外做膨胀功  $W$ , 如图 1-3 所示。如果外界给以同样大小的压缩功  $W$  使系统从状态  $b$  返回, 循着原来的过程曲线经历完全相同的中间状态恢复到原来状态  $a$ , 而且外界也恢复到原来的状态, 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。

可逆过程的特点: 只有无摩擦、无温差传热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。后面章节的讨论主要是针对可逆过程。

## 1.2 热力学第一定律

热力学第一定律的实质就是热力过程中的能量守恒和转换定律, 它建立了热力过程中的能量平衡关系, 是自然界的一个基本规律, 是热力学宏观分析方法的主要依据之一。它指出: 自然界中一切物质都具有能量。能量既不能被创造, 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。热力学第一定律可表述为: 在热能与其他形式能的互相转换过程中, 能的总量始终不变, 转化中能量的总量守恒。

热力学第一定律适用于一切热力系统和热力过程, 不论是开口系统还是闭口系统, 热力学第一定律均可表达为

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统储存能量的变化}$$

### 1.2.1 功、热量及内能

#### 1. 功 $W$

功是与系统的状态变化过程相联系的物理量。在力学中, 功 (或功量) 定义为力和沿力作用方向的位移的乘积。如图 1-4 所示, 表示质量为  $1$  (单位为  $\text{kg}$ ) 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  $A$  ( $\text{m}^2$ ), 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

$$dW = pAdx = pdV \quad (1-16)$$

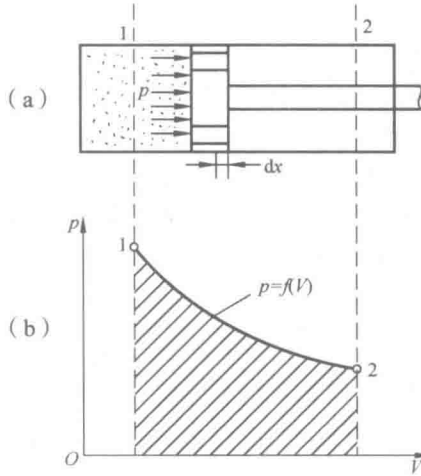


图 1-4 气体在气缸中所做的功

对于可逆过程 1—2，工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-17)$$

如果已知工质的初、终态参数，以及过程 1—2 的函数关系，则可求得工质的膨胀功  $W$ ，其数值等于  $p$ - $V$  图上过程曲线  $p=f(V)$  下面所包围的面积，因此压容图也叫示功图。由图可见，膨胀功不仅同状态的改变有关，而且与状态变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质为 1 kg，其体积为  $V$ ，膨胀功为

$$dW = pdV \quad (1-18)$$

$$W = \int_1^2 pdV \quad (1-19)$$

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  $dV$  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 $Q$

热力学中把热量定义为系统和外界之间仅仅由于温度不同而通过边界传递的能量。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界的效应，即传递中的能量，没有能量的传递过程也就没有功和热量。因此说工质在某一状态下具有多少热量是毫无意义的。

热量和功两者的区别：

(1) 功是两物体间通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量，而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，传热过程中不出现能量形态的转化。

(2) 功转变成热量是无条件的，而热量转变成功是有条件的。

热量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。国际单位制规定热量  $Q$  和功  $W$  的单位都是焦耳 (J)。

### 3. 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，分子在不断地做不规则的平移运动，这种运动的动能是温度的函数。如果是多原子分子，则还做旋转运动和振动，这些能量也是温度的函数。根据分子运动论，工质的动能与温度有关，即与工质的热力状况有关；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，工质的内能是温度与体积的函数。

单位质量工质的内能  $u$  也是一个状态参数，其单位是 J/kg 或 kJ/kg。 $m$  kg 工质的总内能  $U = mu$ ，单位是 J 或 kJ。

工质内能的变化值  $\Delta U = U_2 - U_1$  只与工质的初、终态有关，而与其所经历的过程无关。在热工计算中，通常只需计算内能的变化值，对内能在某一状态下的值不予考虑。

对于理想气体，因假设其分子间没有引力，故理想气体间的分子位能为零，其内能仅是温度的单值函数。

## 1.2.2 闭口系统能量方程

热力学第一定律应用到不同系统的能量转换过程中去，可得到不同的能量平衡方程式。在实际热力学系统中，许多系统都是闭口系统。图 1-5 所示的气缸活塞系统是一个典型的闭口系统。假定气缸中的工质为 1 kg，热力学第一定律可表达为

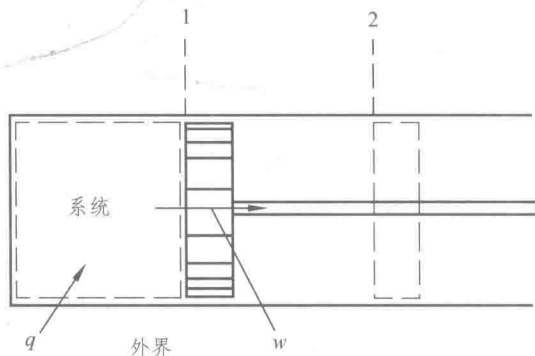


图 1-5 闭口系统示意图

$$q = \Delta u + w \quad (1-20)$$

式中  $q$ ——外界加给每 1 kg 工质的热量 (J/kg)；  
 $w$ ——每 1 kg 工质对外界所做的功 (J/kg)；  
 $\Delta u$ ——每 1 kg 工质内能的增加 (J/kg)。

对于  $m$  kg 工质，有

$$Q = \Delta U + W \quad (1-21)$$

式(1-20)、式(1-21)叫作热力学第一定律解析式或封闭系统能量方程式。式中各项可以是正数、零或负数。公式中的正负号规定：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。以上这些公式是从热力学第一定律直接用于封闭系统而导出的，所以它们对于任何工质、任何过程都适用。

式(1-20)清楚地表明热量和功的转换要通过工质来完成。如果让热机工质定期回到它们的初始状态，周而复始，循环不休，就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力工质的内能不变，即 $\oint du = 0$ 。根据式(1-20)，在该周期工质实际所得的热量将全部转为当量的功。这正是热机工作的根本道理。由此可见，不消耗热量，或少消耗热量而连续做出超额机械功的热机是不存在的。

在导出上述公式时，没有对过程进行的条件做任何规定，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，要求至少这两状态应该是平衡状态。

对于可逆过程

$$W = \int_1^2 p dV \quad (1-22)$$

或

$$w = \int_1^2 p dv \quad (1-23)$$

### 1.2.3 开口系统稳定流动能量方程

开口系统有质量交换，其能量平衡情况比较复杂，一般分为稳定流动和不稳定流动。工程上常用的热工设备除起动、停止或者加减负荷外，大部分时间是在外界影响不变的条件下稳定运行的。这时，工质的流动状况不随时间而改变，即任一流通截面上工质的状态不随时间而改变，各流通截面工质的质量流量相等，且不随时间而改变。这种流动状况称为稳定流动。

对于连续周期性工作的热工设备，如活塞式压气机或内燃机，工质的出入是不连续的，但按照同样的循环过程重复着，整个工作过程也可按稳定流动来处理。

开口系统稳定流动能量方程式广泛应用于汽轮机、燃气轮机、喷管、锅炉等热力设备的热工计算中。

工质在流过热工设备时，必须受外力推动，这种推动工质流动而做的功称为流动功，也称为推进功。如图1-6所示，1 kg工质在开口系统中做稳定流动，设系统在过程中从外界吸收能量 $q$ 并对外输出可利用的机械功。由图可知，1 kg工质流进界面携带进的能量为：动能 $c_1^2/2$  (J/kg) ( $c_1$ 为流速)；位能 $gz_1$  ( $z_1$ 为高度) (J/kg)；内能 $u_1$  (J/kg)；流动功(推进功) $p_1 v_1$  (J/kg)。系统从外界吸入的热量为 $q$  (J/kg)。1 kg工质流出界面所携带出去的能量为：动能 $c_2^2/2$  (J/kg)；位能 $gz_2$  ( $z_2$ 为高度) (J/kg)；内能 $u_2$  (J/kg)；流动功(推进功) $p_2 v_2$  (J/kg)，系统对外输出功 $W_s$ 。根据能量守恒与转换定律，稳定流动式输入能量等于输出能量，即

$$q + \frac{c_1^2}{2} + gz_1 + u_1 + p_1 v_1 = \frac{c_2^2}{2} + gz_2 + u_2 + p_2 v_2 + W_s \quad (1-24)$$

经过整理后可得

$$q = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + W_s \quad (1-25)$$

$$q = \Delta u + \Delta(pv) + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta z + W_s \quad (1-26)$$

式(1-25)为开口系统稳定流动能量方程式。对于1 kg 流动工质,除了自身内能  $u$  外,总随带推进功  $pv$  一起移动,热力学中定义两者之和为焓。

$$h = u + pv \quad (\text{J/kg}) \quad (1-27)$$

焓  $h$  是系统的状态参数。和内能  $U$  一样,其绝对数值难以测量,变化值反映系统的能量变化。将式(1-27)代入式(1-25)中,得到

$$\begin{aligned} q &= h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + W_s \\ &= \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta z + W_s \end{aligned} \quad (1-28)$$

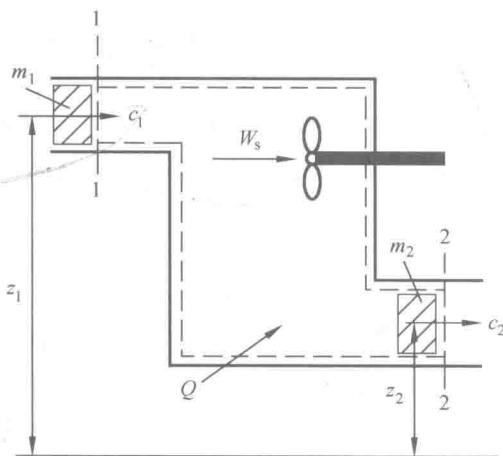


图 1-6 开口系统示意图

#### 1.2.4 焓及温焓图

在应用热力学第一定律建立的各种能量平衡方程中,我们知道功和热都是能量,只不过是两种不同形式的能量。功量和热量都是工质在状态变化过程中与外界进行能量交换的度量,工质膨胀对外输出膨胀功是可逆过程,其大小为

$$dw = pdv \quad (1-29)$$

在这里,压力  $p$  起着动力的作用。然而只有压力没有位移,即没有比体积  $v$  的变化  $dv$ ,



则不可能有功的交换。根据  $dv$  的增大或减少，则可以确定功量的正负。可见功量的交换是通过工质的两个状态参数  $p$ 、 $V$  来进行计算的，并且可以由  $p$ 、 $V$  坐标组成的压容图上用一块面积来表示功量的大小。如图 1-7 (a) 上的曲线 1—2 下的面积所示。

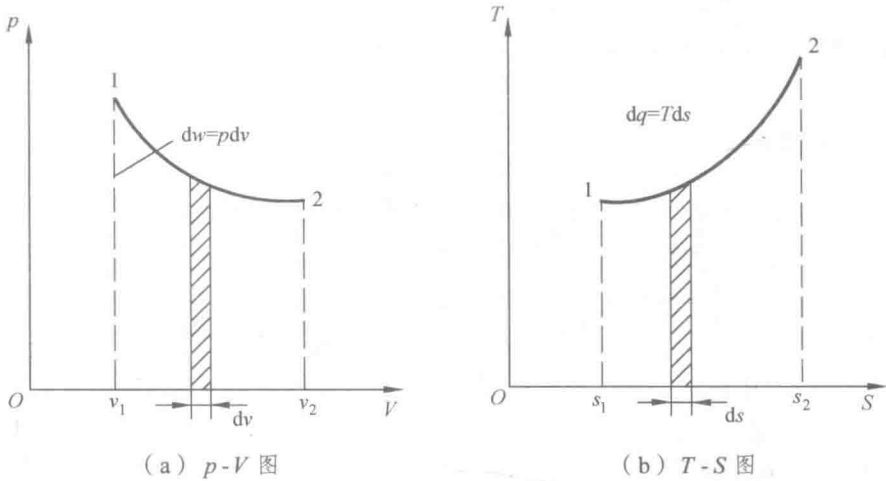


图 1-7 可逆过程的  $p$ - $V$  图和  $T$ - $S$  图

熵是一个导出的状态参数，它的定义式如下

$$ds = \frac{\Delta q}{T} \quad (1-30)$$

式中  $\Delta q$ ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量；

$T$ ——可逆过程中的温度；

$ds$ ——熵的增量。

即熵的定义是：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对温度所得的商。

1 kg 工质的熵  $s$  的单位是  $J / (kg \cdot K)$ ， $m$  kg 工质的熵  $S$  的单位是  $J/K$ 。

与功量的图示相似，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  $T$ - $S$  图上的一个点表示一个平衡状态，一条曲线表示一个可逆过程，如图 1-7 (b) 中的曲线 1—2。

$$\Delta q = Tds \quad (1-31)$$

$$q = \int Tds \quad (\text{从 1 到 2 的热力过程}) \quad (1-32)$$

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，故图  $T$ - $S$  又称为“示热图”。

熵有如下性质：

(1) 熵是一状态参数，如已知两个独立的状态参数，即可求出熵的值。

(2) 只有在平衡状态下，熵才有确定值。