



发动机原理

主编 阎春利 王宪彬

FADONGJI YUANLI



东北林业大学出版社

发 动 机 原 理

FADONGJI YUANLI

主 编 阎春利 王宪彬

东北林业大学出版社

· 哈尔滨 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

发动机原理 / 阎春利, 王宪彬主编. -- 2 版. -- 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5674 - 0796 - 1

I. ①发… II. ①阎… ②王… III. ①发动机-高等学校-教材 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 150532

责任编辑: 姜俊清

封面设计: 刘长友

出版发行: 东北林业大学出版社 (哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号 邮编: 150040)

印 装: 三河市佳星印装有限公司

开 本: 787mm × 960mm 1/16

印 张: 13.25

字 数: 230 千字

版 次: 2016 年 8 月第 2 版

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 53.00 元

如发现印装质量问题, 请与出版社联系调换。(电话: 0451 - 82113296 82191620)

前 言

本教材是为适应本科教学改革的需要,在传统汽车发动机原理的基础上编写的。教材内容力求加强基础,突出针对性、先进性和实用性的特点,将理论与实际相结合。教材在内容上增加工程热力学基础知识,采用最新国家标准,比如车用汽车、柴油的标准、汽车排放法规等,删除过时的化油器式发动机的内容,增加汽油机和柴油机电控技术知识以及汽油发动机增压技术等。在结构编排上注重前后衔接,按照发动机的工作过程分章进行,注意知识的连贯性,如将发动机增压技术放在第八章,因为增压技术对发动机性能的影响体现在各个阶段。每章结尾设有复习思考题,有利于学生对重点知识的掌握。教材是基于作者多年本科教学经验,并参考大量文献基础上编写的,它可以作为高等学校车辆工程、交通运输(汽车运用工程)、汽车服务工程等专业的本科教材,也可作为相关专业的教学用书或工程技术人员的参考书。教材按照参考教学时数40~48学时(含实验4~8学时)编写。

本教材共分为工程热力学基础、发动机循环与性能指标、发动机的换气过程、燃料与燃烧热化学、汽油机混合气形成和燃烧、柴油机混合气的形成和燃烧、发动机特性、废气涡轮增压技术、发动机排放污染与噪声等九章内容,并在教材最后增加了关于发动机台架试验和汽车排放标准的附录。

教材编写过程中,参阅了大量的参考文献,对文献的作者及为我们提供资料的朋友和同仁表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免出现纰漏、不足及错误之处,诚请广大读者批评指正。

编 者

2016年6月于哈尔滨

目 录

1 工程热力学基础知识	(1)
1.1 热力系统及气体的热力状态	(1)
1.2 功和热量	(6)
1.3 热力学第一定律	(9)
1.4 理想气体的热力过程	(13)
1.5 热力学第二定律	(22)
2 发动机循环与性能指标	(28)
2.1 发动机的理想循环	(28)
2.2 四冲程发动机的实际循环与热损失	(34)
2.3 发动机的热平衡	(38)
2.4 发动机性能指标	(40)
2.5 机械效率	(44)
3 发动机的换气过程	(48)
3.1 四冲程发动机的换气过程	(48)
3.2 充量与充气效率	(51)
3.3 影响充气效率的因素	(53)
3.4 提高充气效率的措施	(56)
3.5 进气管的动态效应	(60)
3.6 可变技术	(63)
4 燃料与燃烧热化学	(68)
4.1 发动机的常用燃料	(68)
4.2 燃烧热化学	(78)
5 汽油机混合气形成和燃烧	(81)
5.1 汽油机混合气形成	(81)
5.2 汽油机正常燃烧	(82)
5.3 汽油机不正常燃烧	(85)
5.4 影响燃烧过程的因素	(88)
5.5 汽油机的燃烧室	(93)
5.6 汽油喷射与控制	(97)

6	柴油机混合气形成和燃烧	(100)
6.1	柴油机混合气形成与燃烧室	(100)
6.2	柴油机的喷射与雾化	(106)
6.3	柴油机的燃烧过程	(111)
6.4	影响燃烧过程的因素	(114)
6.5	柴油机电控技术	(121)
7	发动机特性	(128)
7.1	发动机负荷特性	(128)
7.2	发动机速度特性	(131)
7.3	柴油机的调速特性	(136)
7.4	发动机的万有特性	(141)
8	废气涡轮增压	(146)
8.1	发动机增压概述	(146)
8.2	废气涡轮增压系统构造及特性	(150)
8.3	增压器与发动机匹配	(155)
8.4	车用发动机增压的特殊问题及改善措施	(156)
9	发动机排放污染与噪声	(159)
9.1	排放污染及法规	(159)
9.2	发动机噪声及控制	(169)
	参考文献	(174)
	附录	(175)
	附录一 发动机台架试验	(175)
	附录二 汽车排放标准	(181)

1 工程热力学基础知识

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。

1.1 热力系统及气体的热力状态

1.1.1 热力系统

热力学中研究热功转换时,总是研究固定的一些物体或固定空间中的一些物质,在热功转换过程中的行为和它们的变化。热力学中把主要研究对象的物体总称为热力系统;把热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体称为外界;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。

1.1.2 气体的热力状态及其状态参数

热力学中把工质所处的宏观状态称为工质的热力状态。工质的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6个,即压力 p 、温度 T 、比体积 v 、热力学能 U 、焓 H 和熵 S 。其中 p , T , v 三个可以测量的物理量称为基本状态参数。

1.1.2.1 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 p 。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: 一种是指明气体施于器壁上压力的实际数值, 叫绝对压力, 符号为 p ; 另一种是测量时压力计的读数, 叫表压力, 符号为 p_g 。由图 1-1 可知, 表压力是绝对压力高出当时当地的大气压力 p_a 的数值。其关系式为

$$p = p_a + p_g \quad (1-1)$$

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_v , 即

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

真空度的数值越大, 说明越接近绝对真空。

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的。显然, 只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

1.1.2.2 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 SI 中的基本单位。选取水的三相点温度为基本定点温度, 规定其温度为 273.16 K, 1 K 等于水的三相点热力学温度的 1/273.16。国际单位制 (SI) 容许使用摄氏温度 t , 并定义

$$t = T - T_0 \quad (1-3)$$

$$T_0 = 273.15 \text{ K}$$

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。

1.1.2.3 比体积 v

比体积是单位质量的物质所占有的容积, 即

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

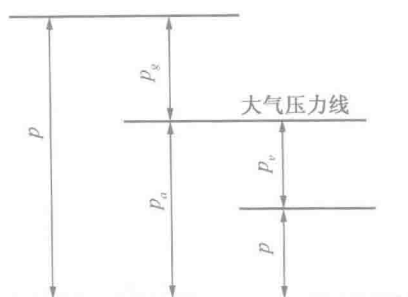


图 1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

式中： v ——比体积；

V ——容积；

m ——质量。

比体积的倒数称为密度 ρ 。密度是指单位容积的物质所具有的质量：

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

比体积的单位为 m^3/kg ；密度的单位为 kg/m^3 。

1.1.3 平衡状态

描述热力系统的状态时，如果整个系统的状态均匀一致，在系统内到处有相同的温度和相同的压力，且不随时间而变化，这样的状态称为热力学平衡状态，简称平衡状态。处于平衡状态时，气体的所有状态参数都有确定的数值。如果外界条件不变，系统的状态始终保持不变。如果受到外界作用，引起系统内温度和压力的变化，破坏了系统平衡状态，则当外界作用停止后，系统将自发地发生机械和热作用，最后系统达到新的平衡状态。

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。

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，用来进行热力学分析。图 1-2 中，1、2 两点分别代表 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；1-2 曲线代表一个内平衡过程。如果工质由 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' 两个平衡态，其过程用虚线表示。

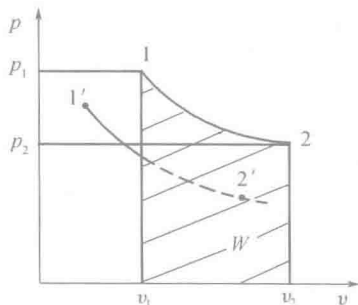


图 1-2 内平衡过程在 $p-v$ 图上的表示

在图 1-2 中，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，恢复到原来的状态 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。

1.1.4 理想气体状态方程式

所谓理想气体, 就是假设在气体内部, 其分子不占体积, 分子间又没有吸引力的气体。

在热力计算和分析中, 常常把空气、燃气、烟气等气体都近似地看作理想气体。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 1 kg 理想气体, 其状态方程为

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

对于 m kg 理想气体, 总容积 $V = mv$, 其状态方程为

$$pv = mRT \quad (1-6b)$$

式中: R ——某种气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$], 它的数值决定于气体的种类。

对于摩尔质量的理想气体, 其状态方程为

$$R_m = \frac{pV_m}{T} \quad (1-7)$$

式中: R_m ——摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

V_m ——摩尔体积, m^3/mol 。

对于任何理想气体, R_m 的数值都相同, $R_m = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 并称为普通比例常数。

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, 即 $F(p, v, T) = 0$, 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。

1.1.5 工质的比热容 (质量热容)

在热力过程中, 热量的计算常利用比热容。工质的比热容就是热容除以

质量。比热容的物理量符号用 c 表示, 单位符号为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。按定义

$$c = \frac{dq}{dT} \quad (1-8)$$

式中: 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, J 。

比热容是物质的一个重要的热力学性质。气体比热容数值与气体的性质、热力过程的性质和加热的状态等有关。

1.1.5.1 单位工质的热容与物理量单位的关系

因为单位工质可用 kg , mol , m^3 表示, 因此单位工质的热容有如下三种:

- (1) 比热容 (质量热容) c , 单位, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。
- (2) 摩尔热容 C_m , 单位, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。
- (3) 标准状态下的体积热容 C_v , 单位, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

1.1.5.2 比定压热容和比定容热容

气体在压力不变或容积不变的条件下被加热时的比热容, 分别叫做比定压热容和比定容热容, 通常用脚标 p 和 V 来识别。定义比热比 $\gamma = c_p/c_v$ 。

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, 所以同样升高 1°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和比定容热容的差是一个常数, 即

$$c_p - c_v = R \quad (\text{梅耶公式}) \quad (1-9a)$$

对于理想气体, 等熵指数 k 为

$$k = \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

等熵指数在工程热力学中有很重要的作用。如果以 k 和 R 来表示 c_p 和 c_v , 由梅耶公式可得

$$\begin{aligned} c_v &= \frac{1}{k-1}R \\ c_p &= \frac{1}{k-1}R \end{aligned} \quad (1-9b)$$

1.1.5.3 常量比热容

在实际应用中, 当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, 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 理想气体的定比热容

理想气体原子数	摩尔定容热容 $c_{v,m}/[J/(mol \cdot K)]$	摩尔定压热容 $c_{p,m}/[J/(mol \cdot K)]$
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 功和热量

1.2.1 功

力学中把物体所受到的力 F 和物体在力的作用方向上的位移 x 两者的乘积, 定义为力所做的功, 并用符号 W 表示, 即

$$W = Fx$$

热力学中, 功就是当系统和外界之间存在压差时, 系统通过边界和外界之间相互传递的能量。

图 1-3 表示 1 kg 工质封闭在气缸内, 进行一个可逆过程的膨胀做功情况。设活塞截面积为 A (m^2), 工质作用在活塞上的压力为 p , 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

$$dW = pAdx = pdV = mpdv \quad (1-10)$$

对可逆过程 1-2, 单位工质由状态 1 膨胀到状态 2 所做的膨胀功为

$$W = \int_{v_1}^{v_2} pdv \quad (1-11)$$

如果已知工质的初、终态参数, 以及过程 1-2 的函数关系, 则可求得单位工质的膨胀功 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, $p-v$ 图也叫示功图。由图可见, 膨胀功不仅与状态的改变有关,

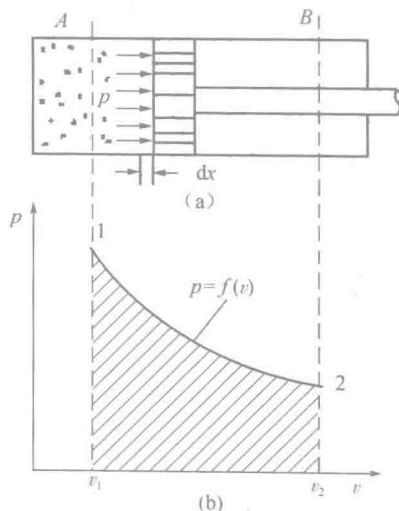


图 1-3 可逆过程的膨胀

(a) 活塞位移示意图; (b) $p-v$ 图

而且与状态变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质质量为 m kg, 其总容积为 $V = m v$, 膨胀功为

$$W = mw = m \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-12)$$

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, 由式 (1-12) 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。

1.2.2 热量

热量是由温度的不同, 系统和外界间穿越边界而传递的能量。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效应, 但热量不可能把它的全部能量表现为使物体改变宏观运动的状态。

热量和功的根本区别在于: 功是两物体间通过宏观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, 而系统传给外界的热量为负。国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳 (J)。

1.2.3 熵

功和热量都是工质与外界间传递的能量, 故两者具有许多共同的特征。功是工质与外界发生机械作用时传递的能量。工质的压力 p 是工质对外界做功的推动力。比容 v 的变化则是衡量工质对外界做功与否的标志。用类比的方法, 既然热量是工质与外界发生热交换时起推动“力”的作用, 于是作为衡量工质对外界做功与否的标志, 必然也应是工质的某种状态参数的变化。这种状态参数就是熵, 用符号 S 表示, 单位为 J/K。1 kg 工质的熵称为比熵, 符号为 s , 单位为 J/(kg·K)。类比于功的关系式, 可以得到

$$dq = T ds \quad (1-13)$$

比熵的定义式为

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-14)$$

式中: dq ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量;

T ——可逆过程的温度 (可逆过程系统与外界的温度随时保持相等)。

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商。熵是工质的一个状态参数。对于工质的每个给定的状态, 熵有确定的数

值。

同功量的图示相似,也可用每个独立的状态参数 T, s 构成的状态图来表示热量,如图 1-4。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。

$$q = \int_1^2 T ds = \text{面积 } 12s_2s_1$$

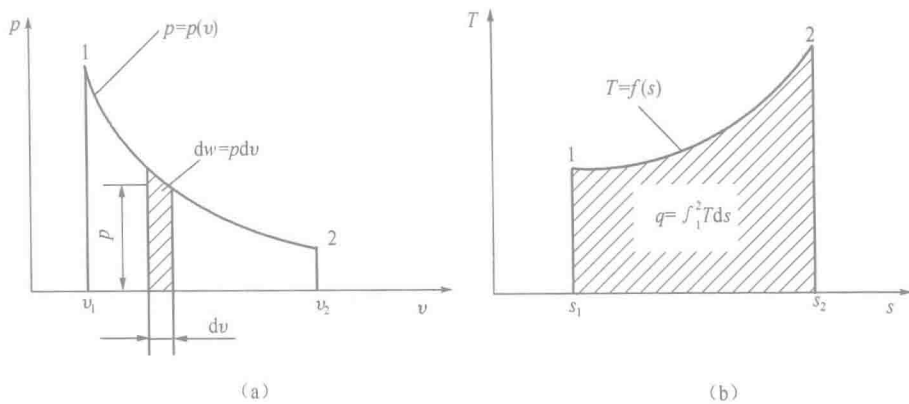


图 1-4 可逆过程的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

(a) $p-v$ 图; (b) $T-s$ 图

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”,它在热工计算中有重要的功用。

对于 m kg 工质的热量 Q ,可按下式计算:

$$Q = m \int_1^2 T ds = \int_1^2 T dS \quad (1-15)$$

从表 1-2 的对比中,可以清楚地看到功与热量的对比关系。熵有如下性质:

(1) 熵是一个状态参数,如已知系统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,熵才有确定的值。

(3) 通常只需求熵的变化量 Δs ,而不必求熵的绝对值。

(4) 熵是可加性的量, m kg 工质的熵是 1 kg 工质熵的 m 倍, $S = ms$ 。

(5) 在可逆过程中,从熵的变化中可以判断热量的传递方向: $ds > 0$ 系统吸热; $ds = 0$ 系统绝热; $ds < 0$ 系统放热。

表 1-2 热力学的功与热

项 目	功	热 量
表达式	$dw = p dv, w = \int_1^2 p dv$	$dq = t ds, q = \int_1^2 T ds$
动力	p	T
能力传递方式	$dv > 0, dw > 0$ 对外做功 $dv = 0, dw = 0$ 不做功 $dv < 0, dw < 0$ 对内做功	$ds > 0, dq > 0$ 工质吸热 $ds = 0, dq = 0$ 绝热 $ds < 0, dq < 0$ 工质放热
图示	$p-v$ 图	$T-s$ 图

1.3 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学中的一种表述。根据热力学第一定律，建立了闭口系统和开口系统的能量方程式，它们是进行热力学分析和热力计算的主要基础。

1.3.1 热力学第一定律

热力学第一定律：热和功可以相互转换，为了要获得一定量的功，必须消耗一定量的热；反之，消耗一定量的功，必会产生一定量的热。

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所做出的功、同时间内工质所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。

1.3.2 工质的热力学能

工质内部所具有的各种能量，总称为工质的热力学能（内能）。由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换，不考虑化学能变化和原子核反应的热力过程，故可以认为这两部分能量保持不变，认为工质热力学能是分子热运动的动能和克服分子间作用力的分子位能的总和。分子动能是由分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动能、原子内的电子振动能等组成。由于工质内的动能与位能都与热能有关，故也称作工质内部的热能。分子热运动动能是温度 T 的函数，分子间的位能是比体积 v 的函数。因此，工质的热力学能取决于工质的温度和比体积，即与工质的热力状态有关。一旦工质的状态发生变化，热力学能也就跟着改变。单位质量工质的热

力学能（比热力学能） u 也是一个状态参数，其单位是 J/kg 或 kJ/kg。 m kg 工质的总热力学能 $U = mu$ ，单位是 J 或 kJ。

工质热力学能变化值 $\Delta U = U_2 - U_1$ ，只与工质的初、终状态有关，而与工质由状态 1 到状态 2 所经历的过程无关。在热工计算中，通常只需计算热力学能变化值，对热力学能在某一状态下的值不感兴趣。

对于理想气体，因假设其分子间没有引力，故理想气体分子间的位能为零，其比热力学能 u 仅是温度的单值函数。

1.3.3 闭口系统能量方程

热力学第一定律应用到不同热力系统的能量转换过程中去，可得到不同的能量平衡方程式。现在讨论最简单的封闭系统的能量转换情况。

封闭在气缸中的定量工质，可作为封闭系统的典型例子。假定气缸中的 1 kg 工质，热力学第一定律可以表达为

$$q = \Delta u + w \quad (1-16a)$$

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；

Δu ——每 1 kg 工质热力学能的增加，J/kg。

对于 m kg 工质来说，则其总热量 Q 为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-16b)$$

式 (1-16a) 叫做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。若 q 为负，表明工质对外界传出热量； w 为负，表明工质接受了外界的压缩功； Δu 为负，表明工质的热力学能减少。

以上公式是从热力学第一定律直接用于闭口系统而导出的，所以它们对任何工质和任何过程都是适用的。

式 (1-16a) 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的初状态，周而复始，循环不息，就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力过程（热力循环），工质的热力学能不变，即 $\oint du = 0$ 。根据式 (1-16a)，在该周期内，工质实际所得到的热量，将全部转变为当量的功。这正是热机工作的基本原理。由此可见，不消耗热量或少消耗热量而连续作出超额机械功的热机是不存在的。热力学第一定律直接否定了这种创造能量的“第一类永动机”。

由闭口系统能量方程，还可以证明理想气体的熵是状态参数。证明如下：

$$ds = \frac{dq}{T}$$

1 kg 理想气体在可逆过程中的能量平衡为 $q = du + dw$, 因为 $du = c_v dT$; $dw = p dv$, 所以 $dq = c_v dT + p dv$ 。

又

$$pv = RT$$

则

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_v dT + p dv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

当理想气体由状态 1 (p_1, v_1, T_1, s_1), 经历可逆过程变化到状态 2 (p_2, v_2, T_2, s_2) 时, 积分上式得

$$\Delta s_{1-2} = s_1 - s_2 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

其中, 第二项只与初、终状态的比体积 v_1, v_2 有关而与过程无关; 第一项中 c_v 是温度的函数, 故该项积分也仅与初终状态的温度 T_1, T_2 有关而与过程性质无关。

如取 c_v 为比定容热容, 则上式更简化为

$$\Delta s = s_1 - s_2 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1-17)$$

既然参数 s 从状态 1 到状态 2 的变化, 只与初态 1 和终态 2 有关, 而与中间所经历的过程无关, 这就说明 s 是状态参数。

在所讨论的封闭系统的能量平衡方程中, 如果系统经历的是比体积不变的定容过程, 由式 (1-11) 得 $dw = p dv = 0$; 由式 (1-16a) 得 $dq = du + dw = du$, 即工质在定容过程中的加热或放热量, 全部变为工质热力学能的增加或减少。

同时根据比定容热容的定义

$$dq = c_v dT$$

故

$$dq = c_v dT = du$$

即证明了对于理想气体, 比热力学能 u 仅是温度的单值函数。

1.3.4 闭口系统稳定流动能量方程式与焓

实际上, 许多热机工作时, 工质通常都不是永远被封闭在热机中, 而是连续地 (汽轮机、燃气轮机) 或周期地 (发动机、蒸汽机) 将已做功的工质排出, 并重新吸入新工质, 工质的热力循环要在整个动力装置内完成。对于有工质流入流出的热力设备, 作为开口系统分析研究比较方便。

工质在开口系统中的流动, 又可分为稳定流动和不稳定流动。对工程上