

民用航空燃气涡轮 发动机原理

瞿红春 林兆福 主编

兵器工业出版社

前 言

本书系根据中国民航大学飞行器动力工程专业的发动机原理课程教学大纲和作者多年来从事民用航空发动机教学经验编写而成。

本书继承建国以来我国使用和编写的相关教材内容，力求反映当前国内外民用航空的实际情况和先进水平。本书着重阐明航空发动机基本概念、基本知识和理论，尽量做到深入浅出、循序渐进、逻辑严密、推导论述细致，易于理解，便于自学。

通过对本教材的学习，能使读者掌握航空燃气涡轮发动机的工作原理、特性和主要性能指标，对各部件的工作原理、共同工作以及各种类型发动机的特性有较深入的了解，为后续课程和今后从事民航机务维修工作打下较坚实的理论基础。

全书共有 11 章，第 1 章作为基本知识，介绍航空燃气涡轮发动机热工气动基础，学过工程热力学和气体动力学的读者可跳过这一章；第 2 章介绍航空燃气涡轮发动机的工作原理和性能指标；第 3~7 章详细地阐述航空燃气涡轮发动机各部件的工作原理和性能；第 8 章讨论涡喷发动机总体性能，即共同工作、调节规律和特性等；第 9 章、第 10 章介绍双转子涡喷发动机、涡桨和涡扇发动机工作原理和性质；第 11 章介绍发动机的热力计算过程。

本书第 4、8、10、11 章由瞿红春编写；第 1、2、3 章由林兆福编写；第 7、9 章由郝英编写；第 5、6 章由程关兵编写。全书由瞿红春统稿。

北京航空航天大学朱行健教授和中国民航大学曹慧玲教授对本书进行了审阅，并提出了许多中肯的修改建议。对此，作者表示衷心的感谢。同时对中国民航大学在本书出版过程中大力支持表示谢意。

由于理论水平和实践经验有限，书中的错误和不妥之处在所难免，恳请读者提出批评指正。

编者

2006 年 8 月

常用符号表

A	截面面积	β	相对气流角度
a	音速	η	效率
B	涵道比	γ	定熵指数
c	绝对速度, 比容	λ	速度系数
c_p, c_v	定压、定容比热容	π	增压比
D	直径	Δ	加热比
EGT	发动机排气温度	ρ	密度
EPR	发动机压比	ζ	燃烧系数
F, F_s	推力、单位推力	σ	总压恢复系数
f	油气比	ω	角速度
H	焓, 飞行高度	下标	
H_u	燃油低热值	a	空气, 轴向
h	比焓	b	燃烧室
m	质量	c	压气机
Ma	马赫数	cor	换算参数
n	转速, 多变指数	col	冷却
N	功率, 转速	cr	临界
p, p_b	压力, 反压	d	设计点
Q	热量	e	喷管
q	比热量	f	燃油
q_m	流量	g	燃气
R	气体常数	H, HP	高压
S	熵	i	进气道
s	比熵	L, LP	低压
sfc	燃油消耗率	m, m	机械, 质量
T	温度	p	膨胀
U	内能	T	涡轮
u	圆周速度	s	等熵
V	气流速度, 容积	t	涡轮导向器, 热
v	比容	u	圆周
W	功	上标	
w	比功	*	气流总参数
α	余气系数, 攻角		

目 录

第1章 热工气动基础	(1)
1.1 基本概念	(1)
1.2 热力学第一定律	(5)
1.3 热力学第二定律	(7)
1.4 完全气体的热力性质	(10)
1.5 热力过程	(13)
1.6 一维定常流的基本方程	(15)
1.7 音速和马赫数	(21)
1.8 滞止参数	(22)
1.9 临界参数和速度系数	(27)
1.10 气体动力学函数	(28)
1.11 膨胀波与激波	(33)
练习题	(38)
第2章 燃气涡轮发动机的工作原理	(40)
2.1 航空发动机概述	(40)
2.2 燃气涡轮发动机的工作原理	(44)
2.3 燃气涡轮发动机热力循环	(45)
2.4 燃气涡轮发动机的推力	(52)
2.5 燃气涡轮发动机的效率	(54)
2.6 燃气涡轮发动机的性能指标	(56)
练习题	(60)
第3章 进气道	(62)
3.1 亚音速进气道	(62)
3.2 超音速进气道	(66)
练习题	(68)
第4章 压气机	(69)
4.1 离心式压气机	(69)
4.2 轴流式压气机基元级工作原理	(73)
4.3 轴流式压气机的叶栅特性	(81)

4.4	轴流式压气机级的工作原理	(85)
4.5	轴流式压气机的参数	(91)
4.6	轴流压气机的流量特性	(97)
4.7	轴流压气机的喘振	(107)
	练习题	(114)
第5章	燃烧室	(116)
5.1	对燃烧室的基本要求	(116)
5.2	燃烧室的分类	(121)
5.3	燃烧室的工作	(123)
5.4	燃烧室的稳定燃烧	(124)
5.5	燃烧室特性	(128)
	练习题	(131)
第6章	涡轮	(132)
6.1	涡轮的类型和组成	(132)
6.2	涡轮膨胀做功原理	(133)
6.3	涡轮的性能参数	(136)
6.4	涡轮特性	(143)
6.5	涡轮的冷却	(145)
	练习题	(148)
第7章	喷管	(149)
7.1	亚音速喷管	(149)
7.2	超音速喷管	(151)
7.3	反推和消音	(155)
	练习题	(157)
第8章	燃气涡轮喷气发动机性能分析	(158)
8.1	稳态下的共同工作	(158)
8.2	调节规律	(168)
8.3	过渡态下的共同工作	(174)
8.4	单轴涡喷发动机的特性	(178)
8.5	涡喷发动机的通用特性	(186)
	练习题	(191)
第9章	双转子涡轮喷气发动机	(193)
9.1	双转子涡喷发动机的特点	(193)
9.2	双转子涡喷发动机的共同工作	(198)

9.3	双转子涡喷发动机的调节规律	(199)
9.4	双转子涡喷发动机过渡工作特性	(201)
9.5	双转子涡喷发动机特性	(202)
	练习题	(205)
第10章	涡桨和涡扇发动机	(206)
10.1	涡轮螺旋桨发动机	(206)
10.2	涡轮风扇发动机	(213)
	练习题	(222)
第11章	燃气涡轮发动机热力计算	(223)
11.1	热力计算的目的	(223)
11.2	单轴涡喷发动机热力计算	(223)
11.3	混合排气涡扇发动机设计点的热力计算	(226)
11.4	分别排气涡扇发动机设计点热力计算	(233)
11.5	变比热热力计算概念	(233)
附录	燃气等温焓差表	(235)
	参考文献	(236)

第1章 热工气动基础

航空燃气涡轮发动机是一种热机，是将燃油燃烧所释放出的热能转变为机械能的装置，而且这种能量转换是在工质连续不断的流动过程中实现的。为了能全面地了解航空燃气涡轮发动机的工作原理、性能及变化规律，必须具备工程热力学和气体动力学的基本知识。

工程热力学是研究能量及其转换的科学。主要内容包括：热力学的基本定律，即热力学第一定律和热力学第二定律；工质的热力性质和热力过程等。

气体动力学是研究气体在流动过程中气体与气体、气体与固体之间相互作用所遵循的规律及参数的变化规律。主要内容包括：气体流动的基本方程、变截面管流等。

1.1 基本概念

1.1.1 热力系

在对任何现象或过程进行分析时，首先要明确研究对象。热力系就是作为热力学研究对象的物质及其所在的空间。正确地选取热力系乃是对任何对象进行正确的热力学分析的前提。没有明确选取热力系之前，对力、热、功等任何问题的讨论都是不可能进行的。

热力系之外能够以某种方式与热力系发生相互作用的局部区域内的物质称为外界或环境。热力系与外界之间的相互作用是指能量（包括热量和功）交换和质量交换。

热力系与外界之间的分界面称为界面。界面可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是运动的。

根据热力系内部情况的不同及热力系与外界之间相互作用情况的不同，热力系可以分为：闭口系——热力系与外界无质量交换；

开口系——热力系与外界有质量交换；

绝热系——热力系与外界无热量交换；

孤立系——热力系与外界既无质量的交换，也无能量的交换。

1.1.2 状态和状态参数

1. 状态

在某一指定的瞬间，热力系所呈现的一切宏观性质的综合表现称为热力系的状态，简称为状态。热力系可能呈现各种不同的状态，其中具有特别重要意义的是平衡状态。

平衡态是热力系与外界不发生相互作用时，其宏观性质不随时间而变化的状态。平衡态是一个理想的概念。但在许多情况下，热力系的实际状态偏离平衡状态并不远，可将它作为平衡状态处理，从而使分析研究大为简化。

2. 状态参数

用来描述热力系平衡状态的宏观物理量称为状态参数。在工程热力学中常用的状态参数有：比容、压力（压强）、温度、内能、焓和熵。

处于平衡状态的热力系，其状态参数都具有确定的数值，而不平衡热力系其状态参数一般是不确定的。因此，状态参数是热力系状态的单值函数，一般都能用连续函数来描述。

可以直接测量的状态参数称为基本状态参数。例如温度、压力、比容。

(1) 比容：单位质量的物质所占有的容积称为比容。其表达式为：

$$v = V/m \quad (1-1)$$

式中：V——容积；

v——比容；

m——质量。

比容的法定计量单位是 m^3/kg 。

(2) 温度：温度表示物体的冷热程度。它是描写处于热平衡状态的热力系宏观特性的物理量。对于气体，温度可以用分子平均移动动能的大小来表示。

温度的数值表示法称为温标。分为热力学温标、摄氏温标、华氏温标等。

热力学温标是与测温物质的性质无关的温标，单位为开尔文。以水的三相点为唯一的固定点，并规定水的三相点的温度为 273.16 K，温度单位为三相点 $1/273.16$ 。

摄氏温标是选用标准大气压下水的两相点（冰水混合物）为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ，沸点为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ ，并将温度视为测温物某一物性的线性函数的温标。

热力学温度与摄氏温度之间的关系：

$$T(\text{K}) = T(^\circ\text{C}) + 273.15 \quad (1-2)$$

(3) 压力（压强）：单位面积上所承受的垂直方向的作用力称为压力。

压力恒为正值，其方向恒为指向作用面。表达式为：

$$p = F/A \quad (1-3)$$

式中：A——面积；

F——垂直方向的作用力。

压力的法定计量单位是 Pa (N/m^2)。由于“Pa”（帕）这个单位太小，工程上常用 MPa（兆帕）或 bar（巴）作为压力的单位。

$$1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa}; \quad 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

热力系的真实压力是绝对压力，用符号 p 表示。

热力系的真实压力超出当地大气压力的部分叫表压，用符号 p_g 表示。

$$p_g = p - p_0 \quad (1-4)$$

式中 p_0 为当地大气压。

热力系的真实压力低于当地大气压力的部分叫真空度，用符号 p_v 表示。

$$p_v = p_0 - p \quad (1-5)$$

因此, 如果需要知道热力系的真实压力, 仅仅知道表压或真空度的读数是不够的, 还必须知道当时当地的大气压, 然后通过上述各式将绝对压力计算出来。

注意: 表压和真空度都不是状态参数, 因为它们的数值不但与热力系的真实压力有关, 而且还与当地的大气压力有关。所以绝对压力才是状态参数。

1.1.3 状态方程和状态坐标系

1. 状态方程

平衡态下基本状态参数压力 p 、温度 T 和比容 v 之间的关系式称为状态方程, 即:

$$F(p, v, T) = 0$$

2. 完全气体状态方程

将气体分子自身体积和分子间作用力忽略不计的气体称为完全气体。实验和理论都表明: 当压力不太高, 温度不太低时, 各种气体都可按完全气体来处理。

对于1 kg 完全气体其状态方程为:

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

式中 R 为气体常数。气体常数 R 只决定于气体的种类, 不随气体的状态而变化。气体常数 R 的法定计量单位为 $J/(kg \cdot K)$ 。空气的气体常数为 $287.06 J/(kg \cdot K)$ 。

对于 m 公斤的完全气体有:

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

3. 状态坐标系

热力系的平衡状态可以由两个相互独立的状态参数单值地确定。它可以表示为由任意两个独立的状态参数所构成的平面坐标系中的一个点。这样的平面坐标系称为状态坐标系(图), 例如 $p-v$ 图、 $T-s$ 图等(其中 s 为状态参数熵)。

1.1.4 热力过程和热力循环

1. 热力过程

热力系从一个平衡态向另一个平衡态变化时所经历的全部状态的总和称为热力过程。热力过程按其性质分为: 准静态过程、可逆过程和不可逆过程等。

准静态过程是由一系列无限接近于内部平衡的状态所组成, 而且以几乎趋近于零的速度进行的热力过程, 也叫做准平衡过程或内部平衡过程。

实现准静态过程的条件是: 热力系内各部分之间及热力系与外界之间的各种不平衡势差为无限小。准静态过程是一个理想化的过程, 但在适当的条件下, 实际过程可以近似地当作准静态过程来处理。因为只有准静态过程才可以用确定的状态参数来描述。

注意: 准静态过程中可能存在耗散(如摩擦等)。

在保持过程路线不变的条件下, 使热力系少输出一部分功同时也少吸收相应的热量的现象称为耗散。引起耗散的因素有摩擦、电阻、磁滞和非弹性变形等。

热力系在经历某一热力过程后, 能够简单地逆转, 使热力系和外界可以同时完全复原的过程称为可逆过程, 否则是不可逆过程。导致过程不可逆的因素称为不可逆因素。不可逆因

素包括温度差、浓度差、化学势差、耗散等。

实现可逆过程的条件是：热力系内部及热力系与外界之间的各不平衡势差为无限小；同时不存在耗散。

可逆过程是一个理想的极限过程，在热力学的理论和实践中都具有重要的意义。

2. 热力循环

封闭的热力过程称为热力循环，简称为循环。此时热力系从一个平衡状态经过一系列的状态又回到原来的平衡状态。热力循环可分为：正向循环（动力循环）、逆向循环（制冷循环）、可逆循环和不可逆循环等。

1.1.5 功和热

1. 功 W

热力系通过边界与外界依靠除温差以外的任何势差所传递的能量称为功。因此，它具有暂时性，不能说在某状态下热力系具有多少功，而只能说热力系与外界交换了多少功。功是过程量，不是状态参数，故在一微元过程中热力系与外界之间交换的功不写成 dW ，而写成 δw ，它不是功的无限小的增量，而是无限小的功。

热力系内单位质量的物质与外界所交换的功称为比功，用符号 w 表示。

热力学中规定：热力系对外界作功，则功为正 ($W > 0$)；外界对热力系作功，则功为负 ($W < 0$)。

单位时间内所完成的功称为功率，用符号 N 表示。

功的法定计量单位为 J，比功的单位为 J/kg，功率的单位为 W， $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ 。

在热力过程中由于热力系容积变化与外界交换的功称为容积功。

在无耗散准静态过程中，热力系与外界交换的容积功为：

$$\delta W = P dV \quad (1-8)$$

由该式可以看出：当 $dV > 0$ ，即气体进行膨胀时，容积功为正；当 $dV < 0$ ，即对气体进行压缩时，容积功为负；当 $dV = 0$ 时，热力系与外界无容积功的交换。

在任意的无耗散准静态过程中，热力系由状态 1 变化到状态 2 与外界交换的容积功为：

$$W_{12} = \int_1^2 P dV \quad (1-9)$$

对于 1 kg 的工质在无耗散的准静态过程中热力系与外界所交换的容积功可表示为：

$$\delta w = P dv \quad (1-10)$$

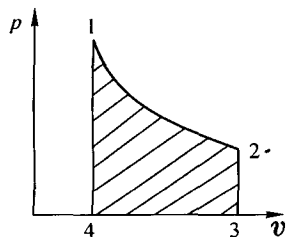


图 1-1 容积功

$$w_{12} = \int_1^2 P dv \quad (1-11)$$

无耗散准静态过程中，容积功在 $P-v$ 图上表示为过程线下与横坐标之间所包围的面积，如图 1-1 中所示的 12341 的面积。该面积周边走向为顺时针时，功量为正；反之为负。

还应指出：上述各式既适用于完全气体，也适用于实际气体。

2. 热量 Q

热力系在过程中通过边界与外界之间依靠温差所传递的能量称为热量。和功一样，热量也具有暂时性，所以也不能说在某状态下热力系具有多少热量，而只能说热力系与外界在过程中交换了多少热量。热量也是过程量，在一微元过程中热力系与外界交换的热量不写成 dQ ，而写成 δQ 。 δQ 不是热量的无限小的增量，而是无限小的热量。

热力系内单位质量的物质与外界交换的热量称为比热量，用符号 q 表示。

热力学中规定：外界对热力系加热，则热量为正 ($Q > 0$)；热力系向外界放热，则热量为负 ($Q < 0$)。

热量的法定单位为“焦耳”(J)，比热量的单位为“焦耳/千克”(J/kg)。

1.2 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热力学中的应用。它确定了热能与其他形式的能量在转换时相互间的数量关系，是热力学的基本定律，同时也是进行热力分析的基础。

工程热力学主要研究热能和机械能(功)之间的转换。故能量守恒与转换定律可表述为：“在热能和机械能(功)的相互转换过程中，能量的总和保持不变”。即：

$$\text{进入热力系的能量} - \text{离开热力系的能量} = \text{热力系储存能量的变化} \quad (1-12)$$

1.2.1 热力系的储存能

热力系储存的能量分为两部分，一部分只取决于热力系本身的状态，称为内能；另一部分与热力系整体运动及外界力场有关，称为外部储存能。

1. 内部储存能——内能

内能是热力系内部储存的各种能量的总和，用符号 U 表示。在工程热力学范围内，内能包括分子运动的动能即内动能和分子间作用力所形成的位能即内位能。内动能大小与气体的温度有关，而与分子之间的距离有关，即在压力一定时与热力系的比容有关。由此可知内能是状态参数，是热力系的温度和比容的函数，即 $U = U(T, v)$ 。对于完全气体，内能只是温度的函数，即 $U = U(T)$ 。

单位质量的物质的内能称为比内能，用 u 表示，即：

$$u = U/m$$

内能的法定计量单位为焦耳(J)，比内能的单位为焦耳/千克(J/kg)。

2. 外部储存能

外部储存能包括宏观运动动能 E_k 和重力位能 E_p 。它们分别为：

$$E_k = mc^2/2; E_p = mgz$$

3. 总能

热力系的总储存能称为总能，用符号 E 表示。它是内能、动能与位能之和，即：

$$E = U + E_k + E_p$$

1 kg 工质的总能量称为比总能量, 用符号 e 表示, 即:

$$e = u + e_p + e_k = u + gz + \frac{c^2}{2}$$

1.2.2 闭口系的热力学第一定律

图 1-2 所示的由汽缸活塞组成的闭口热力系, 在初始平衡状态 1 时, 热力系的内能为 U_1 , 当外界对热力系加入 Q 的热量时, 热力系对外界作了 W 的功, 使热力系达到平衡状态 2, 这时热力系的内能为 U_2 。



图 1-2 闭口系的热力学第一定律

根据能量守恒和转换定律式 (1-12), 在此过程中进入热力系的能量为 Q , 离开热力系的能量为 W , 热力系中储存能量的变化为 $\Delta U = U_2 - U_1$, 于是有:

$$Q = U_2 - U_1 + W = \Delta U + W \quad (1-13)$$

或
$$q = u_2 - u_1 + w = \Delta u + w \quad (1-14)$$

对于微元过程有:

$$\delta Q = dU + \delta W \quad \text{或} \quad \delta q = du + \delta w \quad (1-15)$$

上述各式表明: 闭口热力系与外界交换的热量等于热力系内能的变化与热力系与外界所交换的功之和。它们适用于任何过程, 也适用于任何工质, 是一个普遍适用的关系式。

对于简单可压缩热力系内进行的无耗散的准静态过程, 热力学第一定律表示为:

$$Q = \Delta u + \int_1^2 p dV \quad \text{或} \quad q = \Delta u + \int_1^2 p dv \quad (1-16)$$

对于微元过程, 则有:

$$\delta Q = dU + p dV \quad \text{或} \quad \delta q = du + p dv \quad (1-17)$$

热力系在经过循环后, 热力系与外界交换的循环功等于热力系与外界交换的循环热。所以循环过程中的热力学第一定律表达式为:

$$\oint \delta q = \oint \delta w \quad \text{即} \quad q_0 = w_0 \quad (1-18)$$

1.2.3 焓

焓的定义为:

$$H = U + pV \quad (1-19)$$

可以看出: 焓 H 是状态参数, 对于完全气体焓也只是温度的函数, 即 $H = H(T)$ 。

单位质量物质的焓称为比焓，用 h 表示，即：

$$h = H/m = u + Pv \quad (1-20)$$

焓的法定计量单位为焦耳 (J)，比焓的单位为焦耳/千克 (J/kg)。

考虑到内能与焓的关系，对于简单可压缩热力系内进行的无耗散的准静态过程，热力学第一定律表达式为：

$$Q = \Delta H - \int_1^2 VdP \quad \text{或} \quad q = \Delta h - \int_1^2 vdP \quad (1-21)$$

对于微元过程，则有：

$$\delta Q = dH - VdP \quad \text{或} \quad \delta q = dh - vdP \quad (1-22)$$

$-VdP$ ($-vdP$) 称为技术功，用符号 δW_t (δw_t) 表示，即：

$$\delta W_t = -VdP \quad \delta w_t = -vdP \quad (1-23)$$

利用技术功，热力学第一定律可以表示为：

$$Q = \Delta H + W_t \quad \text{或} \quad q = \Delta h + w_t \quad (1-24)$$

由技术功的定义可知：对于无耗散的准静态过程中技术功在压容图中可以用过程线与纵坐标所包围的面积来表示，如图 1-3 所示。

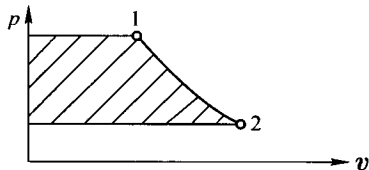


图 1-3 技术功

1.3 热力学第二定律

热力学第二定律的任务是研究热力过程进行的方向、条件和限度。

1.3.1 热力学第二定律的两种说法

一切实际的宏观热力过程都具有方向性、不可逆性。人们从大量的热现象中总结出的热力学第二定律揭示了热力过程的这一基本事实和基本规律。由于热力过程的多样性，人们从不同的方面阐明此规律，从而形成了热力学第二定律的各种说法，常见的两种说法是：

- (1) 开尔文说法：“不可能制造出从单一热源吸热并使之全部转变为功的循环发动机。”
- (2) 克劳修斯说法：“不可能由低温物体向高温物体传送热量而不引起其他变化。”

1.3.2 卡诺循环

卡诺循环是一种工作于两个定温热源之间的可逆循环，由四个可逆过程组成。即两个定熵过程和两个定温过程。

卡诺循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图如图 1-4 所示，这里

- 1-2 可逆的绝热压缩过程；
- 2-3 可逆的定温加热过程；
- 3-4 可逆的绝热膨胀过程；
- 4-1 可逆的定温放热过程。

按卡诺循环工作的热机称为卡诺机。热机的热效率是循环中热力系向外输出的净功 W_0 。

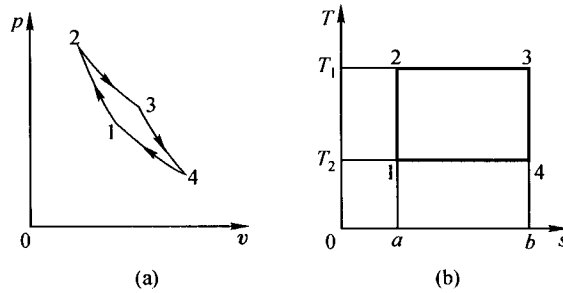


图 1-4 卡诺循环

与循环中热力系获得热量 Q_1 之比，即：

$$\eta_i = \frac{W_0}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

$$Q_1 = \text{面积 } 23ba2 = T_1(S_3 - S_2);$$

$$Q_2 = \text{面积 } 41ab4 = T_2(S_4 - S_1)。$$

因此：

$$\eta_i = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-25)$$

式中： T_1 ——工质在定温吸热过程中的温度，也就是高温热源的温度；

T_2 ——工质在定温放热过程中的温度，也就是低温热源的温度。

从上述卡诺循环的热效率公式中可以得到下列结论：

① 卡诺循环的热效率取决于高温热源的温度和低温热源的温度。当低温热源温度保持不变时，卡诺循环的热效率随着高温热源温度的升高而增大；当高温热源温度保持不变时，卡诺循环的热效率随着低温热源温度的降低而增大。

② 卡诺循环的热效率总小于 1。因为要等于 1，必须使 $T_1 = \infty$ 或 $T_2 = 0$ ；而这两者都是不可能实现的。这说明在任何循环中不可能将从高温热源吸取的热量全部转变为功，而必须有部分热量转移给低温热源。

③ 当 $T_2 = T_1$ 时，卡诺循环的热效率等于 0。

④ 卡诺循环的热效率与所采用的工质的种类无关。

卡诺循环的热效率是在同样温度极限范围内一切其他循环的最大值。企图设计高于卡诺循环热效率的热机是不可能的。因此，在两个极限温度范围内工作的所有热机的热效率将有一个最大值，该最大值是：

$$\eta_{i\max} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (1-26)$$

式中： T_{\min} ——热力循环中的最低温度；

T_{\max} ——热力循环中的最高温度。

实际热机的热效率比这个最大值低得多。

1.3.3 熵和熵方程

在任何循环过程中有：

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (1-27)$$

其中，等式适用于可逆循环，不等式适用于不可逆循环。此式称为克劳修斯积分式。该式反映了一切可能实现的循环所具有的共同特征，即克劳修斯积分永远小于零，极限时也就是可逆循环时等于零，而绝不可能大于零。因此，它可以作为判据，判断循环是否可逆、不可逆或不可能，即判断循环的方向性。

克劳修斯积分等式中的被积函数是一个状态参数，称为熵，即在微元可逆过程中热力系与外界交换的热量 δQ 与换热时热力系的温度 T 的比值：

$$dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{re} \quad (1-28)$$

单位质量的物质的熵称为比熵，用 s 表示，即：

$$s = S/m \quad \text{或} \quad ds = \left(\frac{\delta q}{T} \right)_{re} \quad (1-29)$$

熵的法定计量单位为 J/K，比熵的单位为 J/(K·kg)。

在任意不可逆过程中，热力系与外界交换的热量 δQ 与换热时热力系的温度 T 的比值 $\delta Q/T$ 小于过程中热力系熵的变化量，即：

$$\left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{ir} < dS$$

这是一切不可逆过程的特征，而且也可以将它作为过程是否可逆的判据。下标 ir 表示不可逆。

可将上式改写成：

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_g = \delta S_f + \delta S_g \quad (1-30)$$

$$ds = \frac{\delta q}{T} + \delta s_g = \delta s_f + \delta s_g$$

式中： δS_f ， δs_f ——熵流和比熵流；

δS_g ， δs_g ——熵产和比熵产。

该式称为熵方程，即热力学第二定律解析式。由熵方程可以看出：熵变 dS 是由熵流 δS_f 和熵产 δS_g 两种因素引起的；热力系的熵变可以是正的数值，也可以是负的数值，还可以为零；可逆的绝热过程必为定熵过程。

由于热力系与外界换热而产生的熵的变化量称为熵流。即：

$$\delta S_f = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{或} \quad \delta s_f = \frac{\delta q}{T} \quad (1-31)$$

熵流不是状态量而是过程量。熵流可以是正的数值，也可以是负的数值，还可以为零。熵流是热能中的不可用能部分的表征。

由不可逆因素引起的热力系的熵的变化量称为熵产。

耗散也是一种不可逆因素，对于只存在耗散这一不可逆因素时，熵产可表示为：

$$\delta S_g = \frac{\delta W_f}{T} \quad \text{或} \quad \delta s_g = \frac{\delta w_f}{T} \quad (1-32)$$

熵产不是状态量而是过程量。熵产恒为正值或等于零，即 $\delta S_g \geq 0$ ；熵产是热力系中可用能的不可逆损失的表征。或者说熵产是一切不可逆特征的表征。

熵方程中的核心问题是熵产，熵产也正是热力学第二定律的实质内容。由于能量在转换和转移过程中总是有其他形式的能量转变成热能，而热能又总是由高温传向低温，这些都会引起熵产。这正是热能区别于其他形式能量的特征，也正是一切热力过程的自发性、方向性、不可逆性的根源。

1.4 完全气体的热力性质

1.4.1 比热容

1 kg 质量的物质在无耗散的准静态过程中，温度升高（或降低）1K 所需加入（或放出）的热量称为该物质在此过程中的比热容，用符号 c 表示。

根据比热容的定义，比热容的表达式可写成：

$$c = \frac{\delta q}{dT} \quad (1-33)$$

比热容与物质的种类、聚集态、温度、过程的性质有关。根据过程的性质的不同，比热容分为定压比热容和定容比热容。比热容的法定计量单位是：J/(kg·K)。

1. 定容比热容

1 kg 的气体在容积不变的无耗散准静态过程中，温度升高（或降低）1 K 所需加入（或放出）的热量称为该种气体的定容比热容，用符号 c_v 表示。

根据该定义和无耗散准静态过程中热力学第一定律的解析式，定容比热容表达式为：

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (1-34)$$

此式表明：定容比热容是在比容保持不变时，内能对温度的偏导数。也可以理解为 1 kg 的气体在定容过程中温度变化 1 K 时，内能变化的数值。

定容比热容与气体的种类和温度有关。

2. 定压比热容

1 kg 的气体在压力不变的无耗散准静态过程中，温度升高（或降低）1 K 所需加入（或放出）的热量称为该种气体的定压比热容，用符号 c_p 表示。

根据该定义和无耗散准静态过程中热力学第一定律的解析式，定压比热容表达式为：

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (1-35)$$

此式表明：定压比热容是在压力保持不变时，焓对温度的偏导数。也可以理解为 1 kg 的气体在定压过程中温度变化 1 K 时焓的变化值。

定压比热容与气体的种类和温度有关。其关系可表示为：

$$c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad (1-36)$$

式中 a_0, a_1, a_2, a_3 为与气体种类有关常数。

3. 定压比热容与定容比热容的关系

(1) 梅耶关系式

由定压比热容的定义、完全气体状态方程和热力学第一定律表达式可以得到：

$$c_p = c_v + R \quad (1-37)$$

该式称为梅耶关系式。因为气体常数 $R > 0$ ，所以 $c_p > c_v$ 。

梅耶关系式表明：尽管完全气体的定压比热容和定容比热容都随温度而变化，而它们之差 ($c_p - c_v$) 却与温度无关，恒等于气体常数 R 。

(2) 热容比 γ (定熵指数)

定压比热容与定容比热容的比值称为热容比，又叫绝热指数或定熵指数，用符号 γ 表示。即：

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (1-38)$$

热容比 γ 不但与气体的种类有关，而且还与温度有关。当将热容比作为常数处理时，对于空气 $\gamma = 1.40$ ，对于燃气 $\gamma = 1.33$ 。

(3) 定压比热容与气体常数和热容比之间的关系

根据热容比的定义和梅耶关系式可以得到：

$$c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R \quad c_v = \frac{R}{\gamma - 1} \quad (1-39)$$

1.4.2 完全气体的内能、焓和熵

1. 内能

完全气体的内能中只有分子的动能，而没有分子力形成的位能。由于分子的动能仅仅取决于温度，所以完全气体的内能仅仅是温度的函数，即：

$$u = u(T)$$

根据式 (1-34)，完全气体的内能与温度的关系可通过定容比热容来确定，即：

$$du = c_v dT \quad (1-40)$$

或

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT \quad (1-41)$$