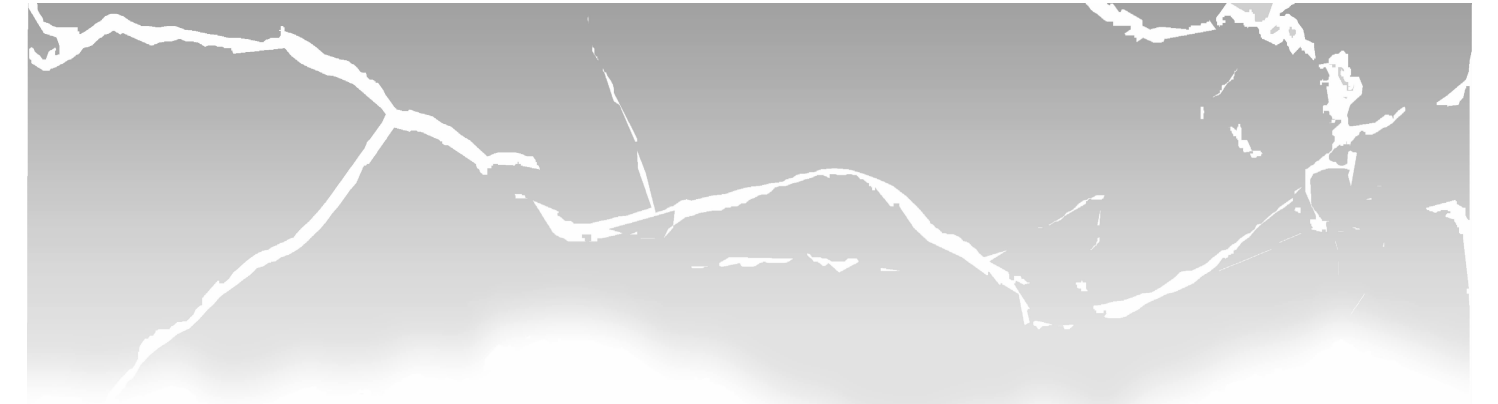




第一篇

汽车发动机性能



第1章

工程热力学基础

1.1 概述

18 世纪末瓦特对蒸汽机的重大改进与发明,以及 19 世纪初蒸汽机在铁路机车及船舶上的广泛应用,推动和促进了热学方面的理论研究,促成了热力学的建立与发展。

1824 年卡诺提出了卡诺定理与卡诺循环,提出热能转变为机械能的根本条件是必须有温度不同的热源与冷源。卡诺定理与卡诺循环为热力学第二定律的建立奠定了基础,在热力学及其发展史上具有极为重大的意义。

1840—1851 年,迈耶、焦耳等人通过对热能转化为机械能的基本规律的研究,提出基于能量守恒及转换定律的热力学第一定律,为热力学分析及热工计算提供了最根本的依据。1850—1851 年,克劳修斯和汤姆逊在卡诺所取得的研究成果的基础上,提出了关于热力过程方向性的热力学第二定律。热力学第一定律和第二定律的提出,标志着热力学的建立,这两个定律以及一些其他基本概念构成了热力学的基础。

19 世纪末期发明了内燃机,因其具有质量小、热效率较高等优点而迅速成为汽车、飞机、船舶、机车等交通运输工具的主要动力装置。在内燃机发明和发展过程中,运用热力学基本理论,对内燃机中的热力过程和热力循环的研究以及提高热效率的研究也得到了发展。

工程热力学以热能转化成机械能的规律和方法、提高转化效率的途径为研究对象。其主要研究内容包括热力学的基本概念和基本定律、热力过程和循环的分析研究及其计算方法、常用工质(如气体和水蒸气)的性质,以及与热动力装置直接有关的一些化学及物理化学问题。

工程热力学采用热力学的宏观研究方法,以热力学第一定律、第二定律等少数基本定律为依据,针对所研究问题的具体情况,根据工质的压力、温度、容积等宏观量的变化,对工质在各种热力过程中所吸收的热量、所做的膨胀功以及循环热效率进行分析计算。

本章的基本目的是,为学习后续各章节所涉及的热力学方面的概念做一个铺垫,因此在本章中仅介绍一些汽车发动机性能中所涉及的最基本的工程热力学知识,在深度和广度上

不予以展开。

1.2 气体的热力性质

不管是内燃机、蒸汽动力装置,还是其他热力发动机,不管它们的结构形状和工作特点存在多大的差异,如果透过五彩缤纷的外表,把它们共性抽象出来,可以发现它们都有一个共同的特点。所有的热力发动机都是利用一种媒介物质,从某一种能源中获取热能,使媒介物质的能量提高,继而对从动机械装置做功,最后把剩余的热能排向大气或冷却液。任何一种热力发动机都遵循这样一个过程,这也是热力发动机的本质特性。因此作为内燃机家族中的汽车发动机(即后续章节所讨论的汽油机和柴油机),都具有这一本质特征。

1.2.1 基本概念

1. 工质、热源和冷源

在热力发动机中,实现热能和机械能相互转换的媒介物质,称为工质。在汽车发动机中,作为能量转换的工质包括空气、燃料和空气的混合物(通常称为可燃混合气)、燃气和膨胀燃烧做功后的废气(通常称为废气)等。

在热力发动机中,工质必须通过吸热、膨胀、放热,才能完成热能转化为机械能的转换过程。在工程热力学中,把工质从中获得热能的物体称为热源,或者称为高温热源;把工质向它放出热能的物体称为冷源。

2. 工质的状态和状态参数

在工质吸热、膨胀、放热的过程中,工质的物理特性是随时间变化的。描述某一瞬时工质物理特性的总标志,称为工质的状态。在给定状态下,表征工质物理特性所用的宏观物理量,称为状态参数。在工程热力学中,表征工质物理特性的基本状态参数主要有温度 t 、压力 p 、比体积 v 等,导出状态参数主要有内能 u 、焓 h 、熵 s 等。

温度是描述物体冷热程度的物理量,表征某一具体温度的数值称为温标。在工程热力学中主要使用两种温标,即热力学摄氏温标和热力学温标。用热力学摄氏温标确立的温度称为摄氏温度,用符号 t 表示,单位为摄氏度,用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。用热力学温标确立的温度称为热力学温度(又称热力学标温),用符号 T 表示,单位为开尔文,用符号 K 表示。

热力学摄氏温标将标准大气压下(即 101.325kPa),纯水的结冰温度(冰点)定为 0°C ,纯水的沸腾温度定为 100°C ,采用等分分度。

热力学温标将分子的方均根速度 $\omega=0$,定义为 0K ,热力学温标与热力学摄氏温标的温度间隔相同。它们之间的换算关系为

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

除了以上两种温标,在西方国家经常使用的温标还有华氏温标和兰氏(朗肯)温标,分别称为华氏温度和兰氏温度,它们的单位分别为 $^{\circ}\text{F}$ 和 $^{\circ}\text{R}$ 。摄氏温度与华氏温度的换算关系为

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}[t(^{\circ}\text{F}) - 32] \quad (1-2)$$

兰氏温度与华氏温度的换算关系为

$$t(^{\circ}\text{R}) = t(^{\circ}\text{F}) + 459.67 \quad (1-3)$$

压力(又称压强) p 是描述单位面积上所受的垂直作用力大小的物理量,单位为 Pa、kPa、MPa,可用式(1-4)表示:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

式中 F ——作用力,N;

A ——受力面积, m^2 。

工程热力学中涉及的压力描述主要有标准大气压、表压力、真空度和绝对压力。

标准大气压:在工程热力学中,把纬度 45° 海平面上的常年平均气压定义为标准大气压,又称物理大气压,其值为 $101.325\text{kPa}(0^{\circ}\text{C})$ 。

在气体压力高于当场大气压的情况下,由压力表测得的气体压力与当时当场测得的大气压力的差值,称为表压力,如图 1-1 所示。

$$p_a = B + p_m \quad (1-5)$$

式中 p_a ——绝对压力;

p_m ——表压力;

B ——当场大气压。

在气体压力低于当场大气压的情况下,由压力表测得的气体压力与当时当场测得的大气压力的差值,称为真空度,如图 1-2 所示。

$$p_a = B - h \quad (1-6)$$

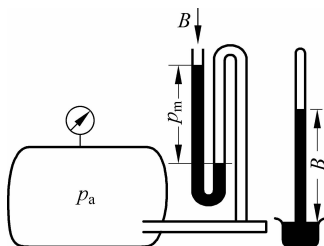


图 1-1 表压力

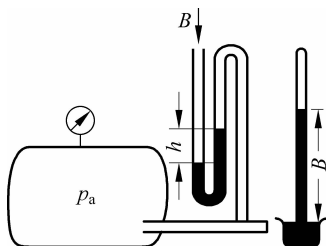


图 1-2 真空度

式中 h ——表示测得的差值,称真空度。

式(1-5)和式(1-6)每项均应使用同一单位, h 与 B 习惯上常用毫米汞柱(mmHg)表示, p_m 、 p_a 则视压力大小而采用 kPa、汞柱或水柱表示, $1\text{mmHg} \approx 0.1333\text{kPa}$ 、 $1\text{kPa} \approx 7.5\text{mmHg}$ 。

比体积(旧称比容) v 是指单位质量物体所占的容积,其与体积质量互为倒数,比体积的计算如式(1-7)所示:

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-7)$$

式中 V ——物体的体积, m^3 ;

m ——物体的质量,kg。

3. 热力平衡状态、状态方程式和坐标图

在热力学研究中,作为分析对象所选取的某一特定范围内的物质或空间称为热力系统。

当一个热力系统的各组成部分之间没有热量传递,称该系统处于热的平衡状态。若一个热力系统的各组成部分之间没有相对位移,则该系统处于力的平衡状态。对于一个同时具备了热和力的平衡的系统,则该系统就处于热力平衡状态。

在一个由气体工质组成的热力系统中,当系统处于热力平衡状态时,该系统各组成部分的基本状态参数具有相同的数值,且相互之间存在确定的函数关系。研究表明,对于一个处于热力平衡状态,由气体工质组成的热力系统,它的三个基本状态参数只有两个是独立的,三个状态参数之间的关系可用气体状态方程式(1-8)表示:

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-8)$$

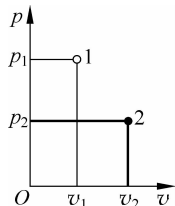


图 1-3 气体的状态

对于处于热力平衡状态,由气体工质组成的热力系统,由两个参数就可以规定气体的状态。因此,工程热力学中广泛采用二维坐标图来描述一定的状态,其中用得最多的是图 1-3 所示的 $p-v$ 图。图中的点 1 表示具有压力为 p_1 、比体积为 v_1 的气体的状态,点 2 表示具有压力为 p_2 、比体积为 v_2 的气体的状态。

应该指出的是,只有处于热力平衡状态的系统,这三个参数才具有式(1-8)的关系,其状态才能用 $p-v$ 图上的一个点来表示。

4. 热力过程和热力平衡过程

在前面的讨论中,已经知道,要连续不断地把热能转化为机械能,工质必须在热力装置中不断地进行吸热、膨胀、排热等过程。即必须通过工质的状态变化过程才能把热能转化为机械能,这一过程称为热力过程。

图 1-4 表示某汽缸—活塞的膨胀过程。若有 1kg 气体,其参数为 p_1 、 v_1 、 T_1 ,作用在活塞上的力为 $p_1 A$ 正好与外力 F_1 相等,此时活塞保持静止不动,气体状态为 $p-v$ 图中的 1 点,此时有 $p_1 A = F_1$ 。若外力减小至 F_2 ,则气体压力将推动活塞右移,在活塞右移过程中,接近活塞的一部分气体将首先膨胀,这部分气体将具有较低的压力和较大的比体积。其后,由于气体分子运动和气体的宏观运动,气体各部分又趋于一致,最后当活塞到达某一位置时,气体压力与外界又重新达到平衡,气体状态为 $p-v$ 图中的 2 点,此时有 $p_2 A = F_2$ 。再一次减小外力至 F_3 ,活塞将继续右移至新的平衡状态 3 点。如前所述,只有处于热力平衡状态系统,才能用 $p-v$ 图中的一个点来表示,因此在图 1-4 中,气体在 1、2、3 点都是平衡状态,但状态 1→2、状态 2→3 的中间过程,则是不平衡的过程。

对于图 1-4 所示的过程,若气体 1→3 的状态变化过程中,温度保持不变,外力 F 每次仅改变一个微小量,且每次改变所经历的时间大于气体状态恢复的时间,则气体每次偏离平衡状态极少,且又会很快恢复到平衡状态。在上述热力过程中,气体压力始终保持无限接近外力(即始终处于力平衡状态),且温度保持不变(即始终处于热平衡状态),这样的过程可以看做热力平衡过程。

因此,热力平衡过程可以这样来描述:在工质状态发生变化的热力过程中,若工质随时都与包围它的外界处于热和力的平衡中,这样的热力过程称为热力平衡过程。对于一个热力平衡过程,在 $p-v$ 图上可以用一条连续变化的曲线来表示,只有平衡的过程才能用热力学

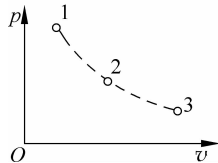
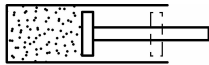


图 1-4 不平衡过程

的方法进行分析。

平衡过程是实际过程理想化的表述,是实际过程进行得非常缓慢时的一个极限。实际过程都是不平衡过程,但在适当的条件下可以近似地当做平衡过程来研究。

5. 热力循环

工质在热力系统中经过几个过程后,重又回到原来的状态,这样几个过程的综合称为热力循环,如图 1-5 所示 $1 \rightarrow a \rightarrow 2 \rightarrow b \rightarrow 1$ 的过程。

汽车发动机把热能转化为机械能的过程,就是通过周而复始的热力循环完成的。虽然在汽车发动机中,工质未在装置内部完成热力循环,但如果把大气环境和发动机看成一个热力系统,则从热力学的观点看,工质仍然完成了热力循环。因为,发动机吸入新鲜空气,经过压缩、燃烧(膨胀)、向大气环境放热(排气),废气在大气中一定会改变状态,最终恢复到与吸入汽缸的新鲜空气相同的状态,从而完成了一个热力循环。

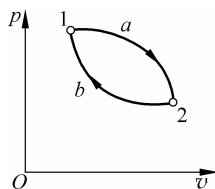


图 1-5 热力循环

1.2.2 理想气体的状态方程

在物质的固、液、气三态中,只有气体才有显著的膨胀能力,因此热力机械中所用的工质一般都是气态物质。但是,由于实际气体的性质非常复杂,为了使分析能进一步深入,在热力学上提出了理想气体的概念。

1. 理想气体

理想气体是一种实际不存在的假想气体,组成理想气体的分子是一些完全弹性、不占据体积的质点,分子相互之间没有作用力。在上述两个假设条件下,气体的分子运动规律可以大大地简化,由此可以得出简单的数学关系式。在热力学计算中,一般气体都可以当做理想气体处理,但是水蒸气则需视其所处状态而定。对于燃气中的水分及大气中的水分,由于其浓度较低,故可以按理想气体处理。

2. 理想气体的基本状态参数

压力 p ,从微观的角度看,气体对壁面的压力是气体分子撞击容器壁面的平均强度,因此压力可用式(1-9)表示:

$$p = \frac{2}{3} n \times \frac{m\omega^2}{2} \quad (\text{kPa}) \quad (1-9)$$

式中 n ——每立方米气体中分子数;

m ——分子的质量,kg;

ω ——分子的方均根速度,m/s。

温度 T ,从微观的角度看,是大量气体分子移动动能平均值的标志,它们之间的关系可用式(1-10)表示:

$$BT = \frac{m\omega^2}{2} \quad (\text{K}) \quad (1-10)$$

式中 B ——比例常数。

式(1-9)、式(1-10)建立了宏观的压力、温度和微观气体分子运动平均动能的关系。从

上述两式中可以看到,若分子没有热运动,此时 $\omega=0$,则有 $p=0, T=0$ 。

比体积 v ,其定义与前述相同,即单位质量气体所占据的容积,计算见式(1-7)。

3. 理想气体的状态方程

在式(1-9)两边分别乘以比体积 v ,并结合式(1-10),可得式(1-11):

$$pv = nv \times \frac{2}{3} \times \frac{m\omega^2}{2} = \frac{2}{3} N'BT \quad (1-11)$$

在式(1-11)中 $N'=nv$,表示 1kg 气体中的分子数,这是一个与气体状态无关的参数。

若令 $R=\frac{2}{3}N'B$,可得式(1-12):

$$pv = RT \quad (1-12)$$

式(1-12)就是著名的克拉贝隆方程,即理想气体状态方程。方程式中的 R 称为气体常数,与气体的状态无关。

1.2.3 理想气体的比热容

使单位物量物质的温度变化 1°C ,加入的热量或放出的热量称为该物体的比热容,可用符号 c 表示。根据此定义,比热容可用式(1-13)表示。

$$c = \frac{dQ}{dt} \quad (1-13)$$

式中 Q ——加入或放出的热量。

比热容的单位由物量单位和热量单位决定,根据物量单位的不同,热力分析中常用的比热容有以下几种。

1. 质量热容和体积热容

以质量作为气体物量单位时所得的比热容称为质量热容或比热容,用符号 c 表示,单位为 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

以标准立方米作为气体物量单位时所得的比热容称为体积热容,用符号 c' 表示,单位为 kJ/标准 m^3 。标准立方米是指在标准状态下,以占据 1m^3 的气体作为单位。

2. 比定容热容和比定压热容

对于不同热力过程中,比热容具有不同的数值。在热力装置中,对工质加热的过程及工质放热的过程大多是在接近定容或定压条件下进行的,因此根据热力过程的特点,比热容又可分为比定容热容和比定压热容。比定容热容用符号 c_V 表示,比定压热容用 c_p 表示, c_V 、 c_p 仅是温度的函数,与其他状态参数无关。

对于定容过程,由于容积保持不变,所加入的热量仅使气体工质的温度和压力发生变化。对于定压过程,由于压力保持不变,所加入的热量除了使工质的温度发生变化外,还要对活塞做功。因此,在温度变化 1°C 的相同条件下,定压过程所需加入的热量比定容过程多,即 $c_p > c_V$ 。

3. 真实比热容、平均比热容和定值比热容

如上所述,比热容仅是温度的函数,与其他状态参数无关,但是比热容与温度的函数关系十分复杂。在不同的温度下,气体工质具有不同的比热容值,如图 1-6 所示。

当温度间隔无限小时,比热容值接近于某个温度点的比热容值,这一比热容值称为某一温度下的真实比热容。

由于真实比热容在实际计算中很不方便,故在工程中引入了平均比热容 c_m 的概念。气体工质从温度 t_1 升(降)至 t_2 时,平均加入(放出)的热量称为平均比热容。若加入(放出)的热量为 Q ,则平均比热容可写成式(1-14)的形式:

$$c_m = \frac{Q}{t_2 - t_1} \quad (1-14)$$

在工程中,为了简化计算,把双原子和多原子单一气体工质的比热容看做与温度无关的常数,此比热容称为定值比热容。在下面分析中所用的比热容,凡是没有特别说明的,都指定值比热容。

4. 混合气体的平均比热容

由于在热力系统中使用的气体工质几乎都是混合气体,因此在分析计算中不能简单地使用单一气体工质的比热容,必须按各组成气体的比例进行计算。混合气体的平均质量比热容 c_{mix} 的计算公式如下:

$$c_{mix} = \sum_{i=1}^n c_{mi} g_i \quad (1-15)$$

式中 c_{mi} ——混合气体中每种气体的温度从 t_1 变化到 t_2 的平均比热容;

g_i ——混合气体中每种气体的质量分数。

1.3 热力学第一定律

热力学第一定律是能量守恒与转化定律在热现象上的应用,在工程热力学范围内,则是热能与机械能之间的相互转化和守恒。

1.3.1 内能

能量是物质运动的度量,由于运动有各种不同的形态,因此就有各种不同形式的能量。在力学中已经研究过的动能和位能,前者取决于物体宏观运动的速度,后者取决于物体在外力场中所处的位置,由于两者都是物体做机械运动而具有的能量,因此都属于机械能。

而当物体宏观上处于静止状态时,其内部的分子、原子等微粒仍在不停地运动,这种运动称为分子的热运动。物体分子热运动而具有的能量称为内热能,在热力学中把内热能称为内能,即储存于物体内部的能量,用符号 u 表示。

气体的内能包括内动能和内位能。内动能由分子的移动动能、转动动能和分子内部的振动动能三部分构成,内动能主要与气体温度有关;内位能是指分子间的作用力,其与分子间的距离有关,是比体积的函数。对于理想气体,由于假设分子间没有作用力,内位能等于零,因此理想气体的内能仅是温度的单值函数。即

$$u = f(T) \quad (1-16)$$

由式(1-16)可知,内能也是状态参数。由于其可由式(1-16)导出,故又称导出状态参

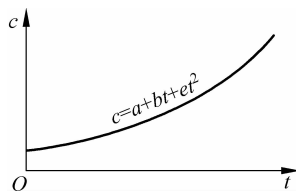


图 1-6 气体工质的真实比热容

数。由于状态参数只与终点的状态有关,而与过程无关,因此如图 1-7 所示,气体从状态 1 经 a 至状态 2 和从状态 1 经 b 至状态 2 的热力过程中,气体内能的改变量相同。即

$$\Delta u_{1-2} = u_2 - u_1 = f(T_2) - f(T_1) \quad (1-17)$$

由此可知,对一个与外界之间只有能量交换(功和热)而没有物质交换的系统,即所谓的闭口热力系统,在一个热力循环中,内能的改变量为零。即

$$\oint du = (u_2 - u_1) + (u_1 - u_2) = 0 \quad (1-18)$$

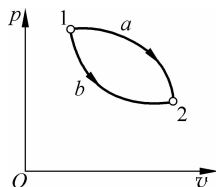


图 1-7 热力过程与内能

1.3.2 工质在热力平衡过程中所做的功

设有 1kg 工质在汽缸中,从状态 1 至状态 2 经历了一热力平衡过程,分别用压力传感器和位置传感器测出汽缸压力和汽缸容积的变化。根据测量结果在 p - v 图上得到 $p=f(v)$ 曲线,如图 1-8 所示。

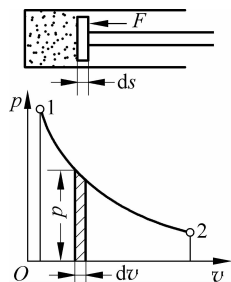


图 1-8 热力平衡过程中所做的功

在此平衡过程中,当活塞移动一个微小距离 ds 时,工质对外所做的功为

$$dw = Fds$$

因为, $F=pA$, 则有,

$$dw = pA ds = p dv$$

在整个热力平衡过程中工质所做的功为

$$w = \int_1^2 p \cdot dv = \int_1^2 f(v) dv \quad (1-19)$$

由式(1-19)及图 1-8 可知,工质在此热力过程中所做的功,相当于过程曲线下的面积。若从状态 1 至状态 2 经历的路径不同,即过程曲线不同,则曲线下的面积也不相同。由此可以得出一个重要结论:工质对外所做的功,与工质状态变化的过程有关,因此功不是状态参数。

现进一步考察图 1-7,工质完成一个热力循环所做的功。在此热力循环中,工质所做的功为 $\oint dw$,很显然 $\oint dw \neq 0$ 。对于图 1-7 所示的热力循环过程,若工质按 $1 \rightarrow a \rightarrow 2 \rightarrow b \rightarrow 1$ 的路径完成此热力循环,则 $\oint dw > 0$,称为正循环;若工质按 $1 \rightarrow b \rightarrow 2 \rightarrow a \rightarrow 1$ 的路径完成此热力循环,则 $\oint dw < 0$,称为逆循环。两条过程曲线围成的面积称为有效功。

1.3.3 热力学第一定律

能量守恒与转化定律告诉我们,能量不可能被创造,也不可能被消灭,但是能量可以从一种形态转化为另一种形态。在能量的转化过程中,一定量的一种形态的能量,总是确定地相对应于一定量的另一种能量。热力学第一定律是能量守恒与转化定律在热现象上的应用,在工程热力学范围内,则是热能与机械能相互转化和总能量的守恒。热可以变为功,功也可以转化为热,一定量的热消失时,必定产生一定量的功;消耗了一定量的功时,必定出