

0-1 热能及其利用

人类在生产和日常生活中,需要各种形式的能量。自然能源的开发和利用是人类社会进步的起点,而能源开发和利用的程度又是社会生产发展的一个重要标志。

所谓能源,是指提供各种能量的物质资源。自然界以自然形态存在的、可以利用的能源称为**一次能源**,主要有风能、水力能(含潮汐能)、太阳能、地热能、化学能(指天然气、石油、煤、氢、氨等可燃气体,生物质等产生的能量)和核能等,其中有些可直接加以利用,但通常需要经过适当加工转换后才能利用。由一次能源加工转换后的能源称为**二次能源**,其中主要是热能、机械能和电能。因此,能量的利用过程,实质上是能量的传递和转换过程,大致如图 0-1 所示。

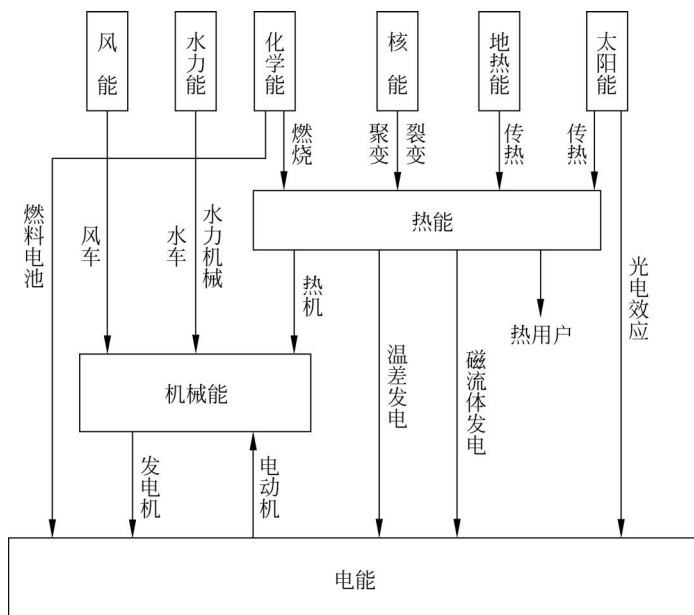


图 0-1 能量转换关系

由图 0-1 可见,在能量转换过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要的作用。一次能源中除太阳能通过光电效应,化学能通过燃料电池直接提供电能以及风能、水力能直接提供机械能外,其余各种一次能源往往都要首先转换成热能的形式。因此,热能的有效开发利用对于人类社会的发展有着重要意义。

热能的利用,有以下两种基本方式:一种是热利用,即将热能直接用于加热物体,以满足烘干、蒸煮、采暖、空调、熔炼等需要。这种方式的利用可追溯到数千年以前。另一种是动力利用,通常是指通过各种热能动力装置将热能转换成机械能或者再转换成电能加以利用,如热力发电、车辆、船舶、飞机、火箭等,为人类的日常生活和工农业及交通运输提供动力。自从18世纪中叶发明蒸汽机以来,至今仅200多年的历史,但却开创了热能动力利用的新纪元,使人类社会生产力和科学技术突飞猛进。可以说,热能动力的利用,奠定了工业革命的基础。

进入21世纪,传统化石能源(天然气、石油、煤等)在能源转换过程中的污染物排放特别是碳的人工排放,引起了全球对生态环境恶化和气候变化的担忧。世界正在经历深刻的能源革命,即逐步减少化石能源使用,能源利用方式向清洁、高效、低碳、智能的方向转型升级。在能源革命的浪潮中,以可再生能源为代表的新型能源动力类型更为丰富,如何更加经济地利用能源,需要我们掌握更多有关能量转换规律方面的知识。

热力学可以定义为关于能量的科学。能量可以被视为引起变化的能力。热力学的名称源于希腊语的 *therme*(热)和 *dynamis*(动力),体现了人类将热量转化为动力所付出的努力。如今,这一名称被广义化,它包含能量和能量转化的各个方面。

自然界的所有活动都涉及能量和物质之间的相互作用,很难想象有哪个领域与热力学没有联系。因此,充分理解热力学的基本原理一直以来都是工程教育的重要组成部分。

0-2 热能转换装置的工作过程

目前,各种热能动力装置仍然是为人类提供动力的主要形式。在动力需求日益增长的今天,如何开发新的能源,如何更高效地实现能量转换,是摆在能量转换学科及动力工程工作者面前的一个十分迫切而又重要的课题。热能的转换和利用,离不开各种热能转换装置,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置以及制冷、空调装置等。为了便于从这些装置中总结出能量转换的基本规律以及共同特性,本节简要介绍几种常用的热能转换装置。

0-2-1 蒸汽动力装置的工作原理

简单的蒸汽动力装置由锅炉、汽轮机、水泵和冷凝器等设备组成,图0-2(a)为其系统简图。

燃料在锅炉内燃烧,其化学能转变为热能,产生高温的烟气。汽锅内的水吸收烟气的热量,变为水蒸气,当它流经过热器时,继续吸热,温度进一步提高,变为过热蒸汽。此时蒸汽的温度、压力比外界介质(空气)的高,具有做功能力。当它被导入汽轮机后,先通过喷管并在其中膨胀,压力、温度降低,而速度增大,热能转换成了汽流的动能。这种高速汽流冲击推动叶片,带动叶轮旋转。汽流的速度降低,动能转化为叶轮的机械能,通过轴转动向外做功,如图0-2(b)所示。膨胀后的乏汽,压力与温度都较低,进入冷凝器后向冷却水放热而凝结成水,并由泵升压后打入锅炉加热。如此周而复始循环,重复上述吸热、膨胀、放热和升压等一系列过程,把燃料燃烧放出的热能源源不断地转换为功。这种装置可简化为图0-2(c)所示的热力系统图。

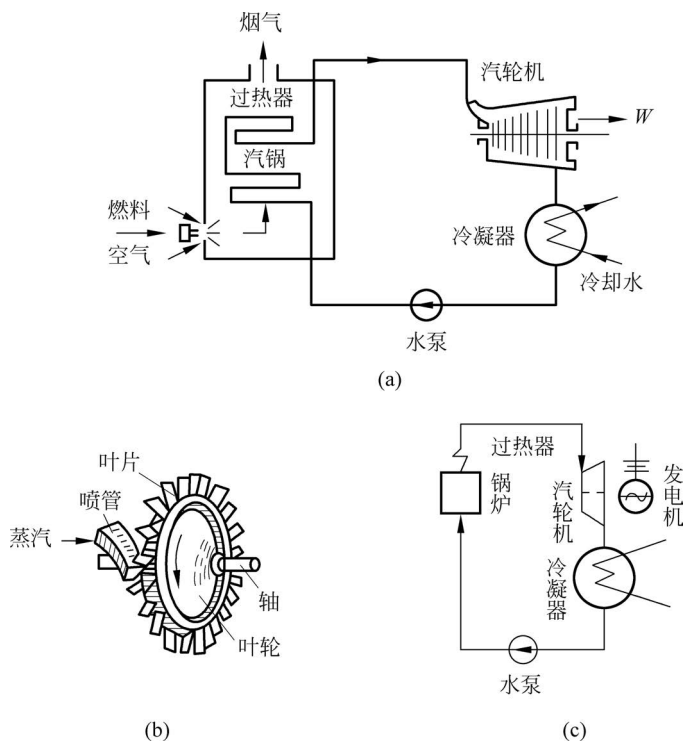


图 0-2 蒸汽动力装置设备简图

0-2-2 燃气轮机装置的工作原理

最简单的燃气轮机装置包括三个主要部件,即压气机、燃气轮机和燃烧室,图 0-3 为其流程示意图。空气和燃料分别经压气机与泵增压后送入燃烧室,在其中燃料与空气混合并燃烧,释放出热能。燃烧所产生的燃气吸热后温度升高,然后流入燃气轮机边膨胀边做功,做功后的气体排向大气并向大气放热。重复上述升压、吸热、膨胀与放热过程,连续不断地将燃料的化学能转换成热能,进而转换成机械能。

0-2-3 内燃机的工作原理

内燃机的工作特点是,燃料在气缸内燃烧,所产生的燃气直接推动活塞做功。下面,以图 0-4 所示的汽油机为例加以说明。

开始,活塞向下移动,进气阀开启,排气阀关闭,汽油与空气的混合气进入气缸。当活塞到达最低位置后,改变运动方向而向上移动,这时进、排气阀关闭,缸内气体受到压缩。压缩终了,电火花塞将燃料气点燃。燃料燃烧所产生的燃气在缸内膨胀,向下推动活塞而做功。当活塞再次上行时,进气阀关闭,排气阀打开,做功后的烟气排向大气。重复上述压缩、燃烧、膨胀、排气等过程,周期循环,不断地将燃料的化学能转变为热能,进而转换为机械能。

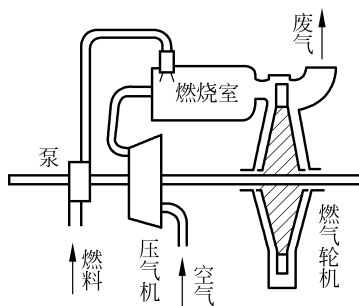


图 0-3 燃气轮机装置流程示意图

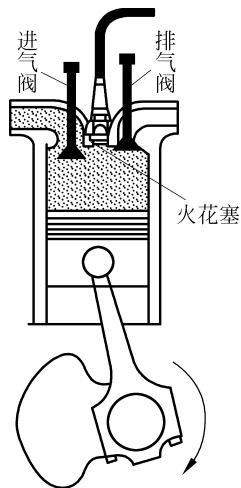


图 0-4 汽油机结构简图

0-2-4 压缩制冷装置的工作原理

以上介绍了热动力装置,其目的是将热能转换为机械能。这里介绍另一类装置,它们消耗机械功来实现热能由低温物体向高温物体的转移,这类装置通常称为制冷装置或热泵。现以氟利昂蒸气压缩制冷装置为例说明其工作原理。

图 0-5 所示系统中,一般采用氟化物作制冷剂。当低温低压的制冷剂蒸气从冷藏室被吸入压缩机后,经压缩变为高温高压的过热蒸气,送至冷凝器冷凝为高压液态制冷剂,再经膨胀机绝热膨胀,降温降压后送回冷藏室,吸收热量而汽化,这时在冷藏室内形成低温制冷的条件。

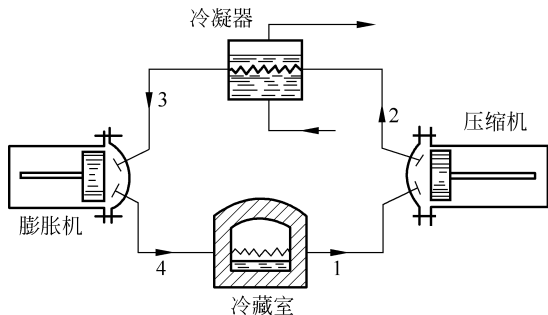


图 0-5 压缩制冷装置流程示意图

上述几种能量转换装置的结构与工作方式虽各不相同,但分析后不难发现它们的共性。首先,实现能量转换时,均需要某些物质作为它的工作物质,称为工质。例如水蒸气、空气、燃气以及氟利昂等。

其次,能量转换是在工质状态连续变化的情况下实现的。热动力装置一般都经历升压、吸热、膨胀和放热等过程。

此外,供给热能动力装置的热能,只有一部分转变为机械能,其余的部分排给大气或冷却水。

以上是通过初步的观察和分析得到的寓于各装置个性中的共性。通过上述分析,不禁会提出一些值得研究的问题,例如:

(1) 为了获得一定数量的机械功,是否必须投入热量?反之,为了使热能从低温物体传给高温物体,是否一定要消耗功或热等作为代价?

(2) 为什么在各动力装置中既要吸热又要放热?这是不是热功转换的必要条件?为什么都要先升压,再吸热,能否先吸热,再升压?

(3) 不同的工质对热功转换的程度有否影响?

(4) 影响能量转换效果的因素有哪些?如何提高其转换效果?

.....

所有这些,正是工程热力学课程所要讨论的问题。

0-3 工程热力学的研究对象及其主要内容

如上所述,工程热力学研究的主要课题,归纳起来,包括以下几个方面。

(1) 研究能量转换的客观规律,即热力学第一定律与热力学第二定律。这是工程热力学的理论基础。其中,热力学第一定律从数量上描述了热能与其他能量(特别是机械能)相互转换时的关系;热力学第二定律从质量上说明热能与以机械能为代表的其他能量之间的差别,指出能量转换的方向性。

(2) 研究工质的基本热力性质。

(3) 研究各种热工设备中的工作过程,即应用热力学基本定律,分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程和循环,探讨、分析影响能量转换效果的因素以及提高转换效果的途径。

(4) 研究与热工设备工作过程直接有关的一些化学和物理化学问题。燃料的燃烧是热能的主要来源之一,而燃烧是剧烈的化学反应过程,因此需要讨论化学热力学的基础知识。

随着科技进步与生产发展,工程热力学的研究与应用范围已不限于只是作为建立热机(或制冷装置)理论的基础,现已扩展到许多工程技术领域中,从航空航天、深海深地探测,到高能激光、芯片和数据中心冷却;从化学精炼、生物工程、空气分离等过程工业,到分布式区域网络、热泵、海水淡化等民生事业,再到适应可再生能源波动的各种储能技术,都需要应用工程热力学的基本理论和基本知识。因此,工程热力学已成为许多有关专业必修的一门技术基础课。

0-4 热力学的研究方法

热力学有两种不同的研究方法:一种是宏观研究方法,另一种是微观研究方法。

宏观研究方法不考虑物质的微观结构,把物质看成连续的整体,并且用宏观物理量来描述它的状态。通过大量的直接观察和实验,总结出基本规律,再以基本规律为依据,经过严密逻辑推理,导出描述物质性质的宏观物理量之间的普遍关系及其他一些重要推论。由于

热力学基本定律是无数经验的总结,因而具有高度的可靠性和普遍性。

应用宏观研究方法的热力学叫作宏观热力学,或经典热力学或唯象热力学。工程热力学主要应用宏观研究方法。

在热力学和工程热力学中,还普遍采用抽象、概括、理想化和简化处理的方法,将往往较为复杂的实际现象与问题,突出本质,突出主要矛盾,略去细节,抽出共性,建立起合适的物理模型,以便能更本质地反映客观事物。例如将空气、燃气、湿空气等简化为理想气体处理,将高温烟气以及各种可能的热源概括成具有一定温度的抽象热源,将实际不可逆过程理想化为可逆过程,以便分析计算,然后依据经验给予必要校正等。当然,运用理想化和简化方法的程度要视分析研究的具体目的和所要求的精度而定。

宏观研究方法也有它的局限性,由于它不涉及物质的微观结构,因而往往不能解释热现象的本质及其内在原因。

微观研究方法正好弥补了这个不足。应用微观研究方法的热力学叫作微观热力学,或统计热力学。它从物质的微观结构出发,即从分子、原子的运动和它们的相互作用出发,研究热现象的规律。在对物质的微观结构及微粒运动规律作某些假设的基础上,应用统计方法,将宏观物理量解释为微观量的统计平均值,从而解释热现象的本质及其发生的内部原因。由于作了某些假设,所以其结论与实际并不完全符合,这是它的局限性。

作为应用科学之一的工程热力学,以宏观研究方法为主,微观理论的某些结论用来帮助理解宏观现象的物理本质。

1-1 热力系统

1-1-1 系统与外界

分析任何现象时,首先应明确研究的对象,分析热力现象也不例外。通常根据所研究问题的需要,人为地划定一个或多个任意几何面所围成的空间作为热力学研究对象。这种空间内的物质的总和称为热力系统,简称为系统或体系。系统之外的一切物质统称为外界。系统与外界的边界面称为边界。系统与外界之间,通过边界进行能量的传递与物质的迁移。

边界面的选取可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是移动的。作为系统的边界,可以是这几种边界面的组合。图 1-1(a)表示的是电加热器对水罐中的水加热的情况。如果只取水作为系统,则其边界如图 1-1(b)所示,这时作为界面的罐子壁面部分是真实的、固定的,而水与空气之间的界面则是假想的、可移动的。如果考虑罐子容器及其中的水作为系统,其边界如图 1-1(c)所示;如果把电加热器、水罐及其中的水作为系统,则其边界如图 1-1(d)所示。由此可见,随着研究者所关心的具体对象不同,系统的划分可以很不相同,系统所含内容也就不同。于是,同一物理现象由于划分系统的方式不同而成为不同的问题。

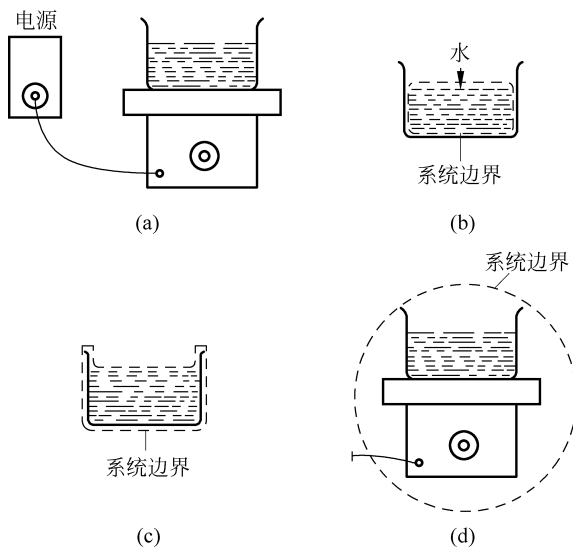


图 1-1 系统边界示例图

1-1-2 闭口系统与开口系统

按系统与外界是否进行物质交换,系统可分为闭口的与开口的两种。

系统与外界之间没有物质交换时,这种系统称为闭口系统。例如取气缸中的空气作为系统。如图 1-2(a)所示,即为闭口系统,虚线表示边界。

闭口系统由于与外界没有物质交换,系统内包含的物质质量为一不变的常量,所以又叫作控制质量系统。但应注意:闭口系统具有恒定的质量;但具有恒定质量的系统不一定是闭口系统。例如,在一个稳定流动系统中,进入与离开系统的质量是恒定的,因而系统内的质量也将不变,但这样的系统显然不是闭口系统。

开口系统是指与外界有物质交换的系统。例如水蒸气流经汽轮机,如图 1-2(b)所示,虚线标出的是所选定的边界。这时水蒸气从汽轮机入口不断地流入汽轮机,做功后又从汽轮机出口不断地流出去。通过边界,系统与外界之间不仅存在着能量交换(例如对外做功等),而且还有物质的交换。

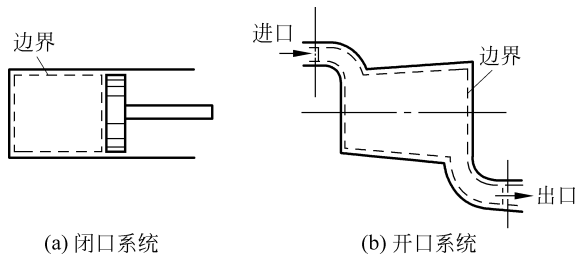


图 1-2 闭口系统与开口系统示例图

通常,开口系统总是一种相对固定的空间,故又称为控制容积系统,大多数热工设备都是开口系统。如果开口系统内工质的质量与参数随时间变化,则称为不稳定流动开口系统,设备的起动、停车过程都属于这种情况。如果开口系统内工质的质量与参数均不随时间变化,则称为稳定流动开口系统。在热力学分析中,大部分的能量转换过程是在稳定流动下进行的,所以,稳定流动开口系统是最常见的系统。

1-1-3 简单系统、绝热系统与孤立系统

根据系统与外界之间所进行的能量交换情况,有所谓简单系统、绝热系统与孤立系统。

- (1) 简单系统是指与外界之间只存在热量及一种形式准静态功^①的交换的系统。
- (2) 绝热系统是指与外界之间完全没有热量交换的系统。
- (3) 孤立系统是指与外界之间既无物质交换又无能量交换的系统。

绝对的绝热系统与孤立系统是不存在的。但是,由于系统选取的人为性,任何一个非孤立系统加上相关的外界,就可以组成一个孤立系统,可以表达为

$$\text{任何非孤立系统} + \text{相关的外界} = \text{孤立系统}$$

孤立系统一定是闭口的;反之则不然。同样,孤立系统一定是绝热的,但绝热系统不一

^① 关于准静态的概念,参见 1-6 节。不同形式的准静态功参见 1-7 节。

定都是孤立的。

1-1-4 均匀系统与非均匀系统,单元系统与多元系统

系统也可按其内部状况的不同而分为均匀系统、非均匀系统、单元系统、多元系统、可压缩系统和简单可压缩系统。

(1) 均匀系统是指内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致的系统,它是由单相组成的。

(2) 非均匀系统是指内部各部分化学成分或物理性质不一致的系统,如由两个或两个以上的相所组成的系统。

(3) 单元系统是指只包含一种化学成分物质的系统。

(4) 多元系统是指由两种或两种以上物质组成的系统。

(5) 可压缩系统是指由可压缩流体组成的系统。

(6) 简单可压缩系统是指与外界只有热量及准静态容积变化功(膨胀功或压缩功)交换的可压缩系统。

工程热力学中讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。

1-2 状态和状态参数

1-2-1 热力系统的状态和状态参数

热力系统在某一瞬间所处的宏观物理状况称为系统的状态。用以描述系统所处状态的一些宏观物理量则称为状态参数。通常系统由工质组成,因此,所谓系统的状态,也就指系统内工质在某瞬间所呈现的宏观物理状况;而描述工质状态的参数也就称为工质的状态参数。

系统或工质的状态是要通过参数来表征的;而状态参数又单值地取决于状态。换句话说,状态一定,描写状态的参数也就一定;若状态发生变化,至少有一种参数随之改变。状态参数的变化只取决于给定的初始与最终状态,而与变化过程中所经历的一切中间状态或路径无关。

1-2-2 状态参数的数学特性

在给定的状态下状态参数的单值性,在数学上表现为点函数,具有下列积分特性和微分特性。

1) 积分特性

当系统由初态1变化到终态2时,任一状态参数 z 的变化量等于初、终态下该状态参数的差值,而与其中经历的路径(如 a 或 b)无关,即

$$\Delta z = \int_{(1,a)}^{(2)} dz = \int_{(1,b)}^{(2)} dz = z_2 - z_1 \quad (1-1)$$

当系统经历一系列状态变化而又恢复到初态时,其状态参数的变化为零,即它的循环积分为零,即

$$\oint dz = 0 \quad (1-2)$$

2) 微分特性

由于状态参数是点函数,它的微分是全微分。设状态参数 z 是另外两个变量 x 和 y 的函数,则

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x dy \quad (1-3)$$

在数学上的充要条件为

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} \quad (1-4)$$

如果某物理量具有上述数学特征,则该物理量一定是状态参数。

1-2-3 广延参数与强度参数

给定状态下的状态参数按其数值是否与系统内物质数量有关,可分为广延参数与强度参数两类。

在给定状态下,凡与系统内所含物质的数量有关的状态参数称为广延参数。这类参数具有可加性,在系统中它的总量等于系统内各部分同名参数值之和。若系统(无论是否为均匀系统)被分为 k 个子系统,则整个系统的广延参数 Y 为

$$Y = \sum_{i=1}^k Y_i \quad (1-5)$$

式中, Y_i 为第 i 个子系统的同名参数值。容积、能量、质量等均是广延参数。显然,无论系统是否均匀,广延参数均有确定的数值。

在给定的状态下,凡与系统内所含物质的数量无关的状态参数称为强度参数,如压力、温度等。强度参数不具可加性。如果将一个均匀系统划分为若干个子系统,则各子系统及整个系统的同名强度参数都具有相同的值。但非均匀系统内各处的同名强度参数不一定都具有相同的值,因而就整个系统而言,强度参数没有确定的值,将视系统的组成而定。例如,某种物质的蒸汽、液体和固体共存于一个系统所形成的三相混合物,其中每一相都是均匀的,但整个混合物是非均匀系统,虽然此非均匀系统中各相的压力相等,但它们的密度却并不相同,整个系统的密度将视系统的组成而定。

单位质量的广延参数,具有强度参数的性质,称为比参数。如果系统内物质的状态参数均匀一致,则系统的广延参数除以系统的总质量,即为比参数。例如,对于容积为 V ,质量为 m 的均匀系统,其比容($v=V/m$)即为比参数。如果系统内各部分状态不均匀,则广延参数对质量的微商为比参数。通常广延参数用大写字母表示,由广延参数转化而来的比参数用相应的小写字母表示,而且为了书写方便,有时把除比容以外的其他比参数的“比”字省略。

类似地,均匀系统的任意广延参数除以系统的总摩尔数就成为所谓的摩尔参数,例如摩尔体积、摩尔能量等。对于非均匀系统,同样应以广延参数对摩尔量的微商表示。

还有一些参数,它们与热力系统的内部状态无关,常常需要借助外部参考系来确定,例如热力系统作为一个整体的运动速度、动能与重力位能(重力势能)等,它们描述热力系统的力学状态,称为力学状态参数或外参数。