

高等学校教学参考书

变质量系统热力学及其应用

吴沛宜 马元 编著

高等教育出版社

高等学校教学参考书

变质量系统热力学及其应用

西安交通大学

吴沛宜 马 元 编著

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是作者在长期从事科研及大量搜集国内外文献资料的基础上编写而成的,内容新颖。像这样专门论述变质量系统热力学及其应用的书籍,国内尚属少见。本书立论比较严密,且文字流畅,既是一本技术基础书籍,又有浓厚的工程气息。

全书共六章。第一、二、三章系统地论述变质量系统热力学的基本概念、基本方程和典型过程的分析。第四章为工程上的若干应用。第五、六两章讨论以变质量热力过程为主要热力过程的新型热机循环。书中列有适当的例题,章末附有参考文献。

本书承高等学校工科热工教材编审委员会委托南京工学院庞麓鸣同志审阅。

本书可作为工科院校动力、低温及工程热物理等专业的高年级大学生、研究生及教师参考用书,也可供有关科技人员参考。

2052/14

高等学校教学参考书

变质量系统热力学及其应用

西安交通大学

吴沛宜 马元 编著

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北香河印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.25 字数 220,000

1983年1月第1版 1984年7月第2次印刷

印数 4,201—5,800

书号 15010·0469 定价 1.40 元

主要符号表

拉丁字母

A	面积
c, c_p, c_v	比热, 等压比热、等容比热
H, h	焓、比焓
k	比热比, $k = c_p / c_v$
M, m	质量
$\dot{m}$	质量流率
n	转速
N	功率
p	压力
Q, q	热量
R	气体常数
S, s	熵、比熵
t	时间
T	热力学温度 (绝对温度)
U, u	内能、比内能
V, v	容积、比容
V	流速
W, w	功

希腊字母

α	换热系数 (放热系数), 相对余隙容积, 转角
ϵ	工作(制冷、制热)系数、压力比

η	热效率
μ	热力学完善度, 化学势
ρ	密度
σ	脉动压力的压力比($\sigma = p_{\max} / p_{\min}$)
ν	容积比
ϕ	能流含量、转角、容积相位角
θ	压力相位角
下标	
CM	控制质量
CV	控制容积
A	室温
c	卡诺循环、冷、制冷、压缩
E	膨胀
H, h	热
w	壁面
i	进入
e	离开
s	死容积
R, r	回热器
上标	
$\sim$	无因次量
$—$	平均
$\cdot$	率

目 录

主要符号表

绪言	1
第一章 基本概念	4
1-1 研究对象和研究方法	4
1-2 平衡状态	8
1-3 热力系统	10
1-4 热力系的描述	12
1-5 系统与外界间的相互作用	15
1-6 过程	16
1-7 循环	20
1-8 控制容积分析法	22
参考文献	25
第二章 基本方程	26
2-1 状态方程及热性质	26
2-2 变质量系统质量守恒方程	27
2-3 变质量系统热力学第一定律表达式	32
2-4 变质量系统热力学第二定律表达式	39
2-5 变质量系统基本方程	47
2-6 多元系统化学势	48
2-7 变质量系统过程方程的一般表达式	52
参考文献	51
第三章 典型的变质量系统热力过程	56
3-1 刚性容器的充气(汽)过程	57
3-2 刚性容器的放气(汽)过程	64
3-3 刚性容器绝热放气的最大理论功	74
3-4 有边界功的绝热充气过程	79
3-5 充、放气过程的实验结果及与理论比较	84
3-6 有质量变化的膨胀和压缩过程	89

3-7	有漏气的压缩过程.....	95
	参考文献.....	104
第四章	工程中若干变质量热力过程的分析.....	106
4-1	内燃机和压缩机热力工作过程计算机模拟的能量方程.....	106
4-2	内燃机排气过程和弹丸从炮膛射出后气体压力和温度随时间的变化.....	113
4-3	活塞式压缩机变工况的热力学分析——等温模型.....	116
4-4	活塞式压缩机变工况的热力学分析——绝热模型.....	129
4-5	回热式热机理想循环传热量的通用计算式.....	136
4-6	不稳定流动回热器的气流能量方程.....	140
4-7	回热器中气体的平均温度.....	146
4-8	液体火箭发动机气压式燃料供应系统的热工计算.....	149
	参考文献.....	152
第五章	利用充气 and 放气过程的低温制冷机循环.....	154
5-1	关于回热式热机的总述.....	154
5-2	吉福特-麦克马洪制冷机循环.....	156
5-3	索尔凡制冷机循环.....	175
5-4	脉管制冷机循环.....	187
	参考文献.....	199
第六章	利用变质量膨胀和压缩过程的低温制冷机及发动机循环.....	201
6-1	斯特林制冷机和发动机循环.....	201
6-2	维勒米尔制冷机循环.....	254
6-3	分置循环的制冷机循环.....	274
6-4	关于回热式热机的小结.....	282
	参考文献.....	286

绪 言

变质量系统热力学研究变质量系统热功转换的规律和方法, 主要包括变质量系统热力学的基本概念及适用于这种系统的基本定律的表达式、变质量系统的热力过程(又称变质量热力过程)及这些过程组成的热力循环。所谓变质量热力系统是指热力系统在进行热力过程时, 系统中工质的数量也同时发生变化。这时, 工质的数量与压力、温度等参数一样, 也是表征系统特性的一个参数, 而且, 在某些情况下它是起主要作用的参数。

工程中有许多变质量热力过程。例如, 对一容器充入气体或者自一容器放出气体时, 以容器壁面为控制面的热力系统, 在进行过程时工质的数量有很大的变化, 它的变化的大小和快慢将直接影响到其它参数(压力、温度等)的变化情况。又如, 像有漏气的压缩过程这样一类问题, 则是气体在气缸中膨胀或压缩的同时有工质流入或者离开气缸。这时, 以气缸内壁面为控制面的热力系统也是一个变质量系统。这种有工质数量变化的膨胀和压缩与没有工质数量变化的情况相比, 在参数间关系以及功量和传热量的计算方面都有不少差别。此外, 有相变和化学反应的过程, 对每一相或每一组元来说, 同样也可以看成是变质量过程。

在热力循环方面, 以充气或放气过程为主要热力过程、或以变质量的膨胀和压缩过程为主要热力过程的回热式低温制冷机, 如吉福特-麦克马洪(Gifford-McMahon)制冷机^①、索尔凡(Solvay)制冷机、脉管制冷机、斯特林(Stirling)制冷机、维勒米尔(Vuilleumier)制冷机、分置循环制冷机等等, 以及斯特林发动机、

① 吉福特-麦克马洪(Gifford-McMahon)制冷机以后简称 G-M 制冷机。

比尔(Beale)发动机等等,都是近廿年来迅速发展起来的新型制冷机和发动机。由于它们的主要热力过程都是变质量过程, 它们的循环与工程热力学中所讨论的热机循环就有很大的差别, 其中很重要的一点是, 每一个工质微团在每一次循环中所经历的循环过程并非完全相同。因此, 不能够象工程热力学那样, 任取系统中的单位工质为研究对象, 而必须探讨适用于有变质量热力过程在内的热力循环的分析方法。

另外, 六十年代以来, 用电子计算机来模拟热机的热力工作过程已成为热工领域的一个重要的研究方面, 并且在工程设计和试验研究中得到应用。为了适应计算机模拟的需要, 譬如说, 需要有一个能够适用于热机中各种热力过程的统一能量方程, 包括适用于其中有质量变化的、像内燃机的排气和吸气这样一些过程。因此, 有必要讨论比工程热力学所讨论的稳定流动能量方程更为一般化的热力学第一定律表达式。

尽管对变质量系统热力学有许多方面的需要和应用, 而且, 在近代有不少的研究论文中结合具体问题也有零星的论述, 遗憾的是至今仍未见到有一本系统的、专门的著作。本书试图对此作一尝试。本书在搜集国内外大量文献资料以及我们所从事的科研工作的基础上, 从热力学基础理论和工程应用两个方面, 对变质量系统的热力学问题作一系统的整理和论述。本书共六章, 第一、二、三章为变质量系统的基本概念、基本方程和典型过程的分析。第四章综合运用前三章的基本理论来讨论若干工程应用问题。第五、六两章为以变质量热力过程为主要热力过程的热机循环分析。全书把基础理论和工程应用有机地联系在一起, 力求对基础理论阐述清楚, 并系统运用基础理论解决实际问题。书中把多种工程实际问题热力学化: 把工程问题抽象为热力学模型, 应用变质量热力学的概念、公式和方法透彻阐述工程问题的热力学本质, 得出一些

有价值的公式和结论,供工程应用。书中列有一些例题,同时引入某些重要的试验结果,以便与理论相比较。本书既是一本技术基础书籍,又有浓厚的工程气息。对于更深入的但已超出本书范围的内容则列出参考文献供读者查阅。

变质量系统热力学属于宏观热力学范畴,阅读本书要求具有工程热力学的基本知识。

本书可作为工科动力类、低温及工程热物理等专业高年级大学生、研究生、教师参考用书,亦可供有关科技人员参考。

本书承高等学校工科热工教材编审委员会所委托的南京工学院庞麓鸣同志审阅,我们在此深表谢意。

由于作者水平有限,又是初次尝试,编写时间也很短促,缺点与错误之处,恳切希望读者批评指正。

第一章 基本概念

1-1 研究对象和研究方法

热力学是研究能量、能量转换及其与物质性质之间关系的科学。由于能量是物质运动的量度,因而又可说热力学是研究物质的热运动和其他各种运动形态之间相互转换的规律及热运动对物质性质的影响的宏观理论。由于热现象普遍存在于各种自然现象中,所以热力学研究的问题涉及到各种不同的现象,如物理现象、化学现象、生物现象等。

研究上述这些规律及与此有关的各种问题有两种不同的方法,一种是宏观热力学的方法(又称准象热力学方法),另一种是统计热力学的方法。两种方法的研究目标基本相同,两种方法各有其优缺点。

宏观热力学方法是根据由大量所感觉的宏观现象而总结得到的自然界的基本规律,也就是根据热力学第一和第二定律,应用演绎的方法得出各种推论。因而,用热力学方法研究问题时,只要不加任何假定,它的一切推论十分普遍和可靠,这是热力学方法的优点。但是,因为它所根据的是物质所共有的宏观现象,不考虑物质内部的分子结构及其行为,因而无法深刻阐明热现象的本质。只能求得有关物性的各物理量之间的普遍联系,而不能求得物质的具体性质。有关物质的具体性质都要由实验来确定。统计热力学方法则深入到物质内部,根据物质的分子结构和行为进行统计规律性的分析,因而能更深刻地阐明各种现象的物理本质,而且在对具体物质的分子结构作了某些假定后,就能求得物质的具体性质。

但是,因为它所根据的物质结构模型只是实际情况的某种近似,因而所得结果的可靠性往往有一定局限。

通常所称的热力学,实质上是热静力学。热力学只研究热运动的特殊形态——热动平衡状态(简称平衡态)或几乎平衡的准静态。热力学所研究的热力系的种种变化过程都是一系列平衡态或准静态的连续变化。而这种过程的进行和这种状态的达到从理论上讲需要的时间为无限长,因而热力学没有引入时间这一变量,不涉及过程的速率。由于热力学只研究热力系的平衡性质,因而又称作平衡热力学。对于迅速地不平衡的现象,热力学只能对其作一些定性的说明。直到最近数十年才开始建立研究不平衡现象的非平衡热力学(也称不可逆过程热力学),或相应地称为热动力学。

工程热力学是宏观热力学的一个重要分支,主要是研究热和功之间的转换规律、方法及物性。目的在于制定热机理论。为了研究热力设备中实现的化学过程和物理化学过程,工程热力学中也包括部分化学热力学的内容。由于工程实际中出现的热力学问题越来越多,工程热力学的内容不断有所发展。变质量系统热力学是工程热力学的延伸和扩展,同时又运用了某些不可逆过程热力学的概念和知识。变质量热力学以变质量热力系为研究对象,内容包括:适用于变质量系统的热力学基本定律的表达式,变质量热力过程的参数变化规律,系统与外界进行热量、功量以及质量交换的规律,以变质量热力过程为主要过程的热机循环。

我们知道,工程热力学所研究的通常是常质量热力系统,也就是说,进行热力过程和热力循环时系统内工质的数量保持不变,而且每个工质微团所经历的热力过程和热力循环均相同。例如,在分析气缸中气体的膨胀或压缩时,取气缸中的工质为封闭系,这时必须假定活塞与缸壁间完全密封,没有泄漏。对于开口系,常质量系统只研究稳定流动,也就是进入和离开系统的质量流率时时相

等,系统中质量恒定不变。对于常质量热力系,我们可以任取单位工质作为分析对象,全部工质的总效果只是单位工质效果的简单放大而已。

可是,在工程实践中有许多这样的情况,即在过程进行中工质的数量也在变化,而且在有些情况中工质量的改变甚至成为影响热力过程参数变化以及系统与外界热功交换的一个重要因素。工质数量发生变化的系统称为变质量热力系统,这种系统所经历的状态变化过程称为变质量热力过程。典型变质量热力过程的例子就是对固定容积容器的充气过程以及气体从固定容积的容器中放气。内燃机排气阀开启后的排气过程,压缩机对气瓶的充灌,压缩机或抽气机对某一容器的抽吸,弹丸从炮膛中射出后膛内气体的排出,液体火箭发动机气压式供应系统中高压气体把贮箱中的燃料推出等等,都是利用充气和放气的原理。另一类典型的例子是工质在气缸中膨胀或压缩时工质的数量同时有变化。例如任何实际的压缩过程总免不了有泄漏,在回转式压缩机以及高压往复式压缩机中泄漏更为严重。本书后面的分析将会表明,泄漏量是影响过程参数变化的一个参量,与无泄漏情况相比,过程中参数的变化规律在定性和定量上均不尽相同。还有一种情况是,活塞-气缸组件与其他设备相连接时,其间没有阀门。这样,当取气缸内容积为控制容积时,在活塞来回运动的过程中,缸内气体自然可以自由地出入控制容积。这时,控制容积内工质的数量将会发生很大的变化。上述典型的两类变质量热力过程,不仅作为单个过程在工业实践中已大量应用,而且它们已被作为主要的热力过程而用于热机循环。近廿年来迅速发展起来的回热式热机,包括斯特林发动机、比尔发动机以及各种新型的低温制冷机——G-M 制冷机、索尔凡制冷机、斯特林制冷机、维勒米尔制冷机、分置循环制冷机和脉管制冷机等,它们或是利用充气、放气过程作为循环的主要过程,或者

利用有质量变化的膨胀、压缩过程作为循环的主要过程。在这种热机或制冷机循环中，每个工质微团所经历的热力过程和循环不是完全相同的，很明显，这与一般工程热力学所讨论的循环有很大的差别。分析这些循环就必须借助变质量热力学的方法。

研究变质量系统热力学再一种实际的需要是，由于六十年代来高速数字计算机的广泛应用，热机工作过程的计算机模拟发展十分迅速，它已成为研制和调试新机器的一个重要手段。同时，作为一个理论研究课题，为许多学者所重视。计算机模拟的第一步就是建立描述各种实际过程的微分方程。对于能量方程，它必须是一般化的并适用于发生在热力系统中的各种实际过程。譬如说，用于内燃机的计算机模拟的能量方程必须同时可以适用于吸气、压缩、燃料加入、膨胀以及排气等过程。这样，就有必要从基础理论上论证并导出变质量系统的最一般的方程，以适应上述需要。

广义地说，有相变和有化学反应的过程也属于变质量过程^[1]。这时，虽然总系统的质量不变，但对每一个相或每一组元的物质来说，在相变和化学反应过程中，其工质的数量将发生变化。

对上述这些问题，变质量热力学将要讨论。

对于在热力过程中工质数量发生变化的变质量系统，工质量 m 也是一个表征系统状态的参数。另外，因为系统的工质量要随时间变化，就需要引入时间 t 这个参数。

既然变质量系统热力学是工程热力学的延伸，属宏观热力学的范畴，因而它也以两大定律为基本依据，运用演绎的方法得出各种结论。有关工程热力学的基本概念和许多基础知识在研究变质量系统问题时仍十分有用。但是，由于两者所研究的一个是变质量系统，一个是常质量系统，因而，所用的具体方法和所得到的结论都有所不同，这将在以后一一叙述。

1-2 平衡状态

一、热动平衡

热力学是以平衡态为基础的，平衡状态是热运动的一种特殊形态，它是这样一种状态：“在没有外界影响的条件下，物体的各部分在长时间内不发生任何变化。^[2] 换句话说，如果没有外来的影响，在一定时间之内这个物体将达到长期不变的状态。”系统处于平衡状态则具有如下特征：

(1) 在所研究的物体中，一切宏观变化都停止，即表征该物体宏观性质的每一参数的数值都不随时间变化。

(2) 已达到平衡态的物体，在不变的外界条件下，可以在很长但仍为有限的时间内，一直停留在这个状态。要破坏平衡态则需要改变外界条件。这里所谓的不变的外界条件是指：所研究的系统是孤立的，除了恒定的外力场外，没有任何其他的相互作用。

二、平衡与均匀

当系统的各部分是完全一律的时候，这种系统叫作均匀系，又叫单相系。若系统的各部分之间有差别，就是不均匀系，或叫作复相系。因而，平衡是指没外界影响下状态不随时间而变，均匀是指不随地点而变。对于一个气相或液相系，当其达于平衡态时，系统也是均匀的，即系统状态不随时间而变，也不随地点而变。

系统在所谓孤立的条件下，它各处的压力和温度总要趋向均匀一致的（即由不平衡趋向平衡），而一旦均匀一致后就能在有限的时间内保持不变而不再能自发地趋向不均匀。由不均匀趋向均匀，即由不平衡趋向平衡的过程称为弛豫过程，所需的时间称为弛豫时间。这一时间的长短由弛豫过程的性质决定，例如在气体中压力趋向均匀的时间是很短的，一般只要 10^{-10} 秒。为什么这么

快? 因为分子运动的速度极大, 如 273K 时 H_2 的均方根速度达 1838m/s, He 的均方根速度为 1300m/s; 50K 时则 H_2 和 He 的均方根速度分别为 790m/s、560m/s。所以只要外界作用的变化不十分迅速, 则外界通过界面对系统的作用就将迅速地传到整个系统的各个工质微团。这一瞬时性原则在变质量系统中进一步推广为: 外界通过边界面的热、功作用以及由于工质微团进入、离开系统所引起的影 响, 将瞬时地传递到系统中工质的各个微团。

在研究变质量系统时要引入局部平衡 (也是局部均匀) 的假设。若系统是不平衡的, 可将它划分成若干个子系统。子系统不能太大, 以免其“表面”相互作用而引起不均匀性; 子系统也不能太小, 以致无法用宏观方法来处理^[3]。所分的这种宏观上足够小, 微观上又足够大的每一子体系都处于局部平衡。

三、平衡与稳定

所谓没有外界影响是指外界对系统既不作功, 又不传热, 也不交换物质。假如外界对系统发生影响, 系统就不是处于平衡态, 不能把平衡态简单地说成是不随时间改变的状态, 也不能简单地说成是外界处在不变条件下的状态。在一定的外界作用下保持不变的状态不是平衡态, 只能说是一种稳定态。举例来说, 一个金属棒, 在不变的温差作用下, 金属棒各点的温度虽不同, 但不随时间而变。这时有热量稳定地从棒的一端传到另一端, 属稳定热传导。金属棒的温度分布不随时间而变, 但有温差作用, 因而是处于稳定状态。可见, 温差的存在使系统处于热的不平衡, 从而产生热流。温差的消失 (即没有外界作用) 则是系统建立热平衡的条件。

如果系统与外界间有压差, 则可移动边界会在压差作用下有宏观位移, 产生功的传递, 并引起系统状态的变化。同样, 由于密度差会引起质量的转移。对于复杂的热力系来说, 还可能出现电势差引起的电流, 化学势差引起的化学变化等等。由于温差、压差、

密度差、电势差、化学势差的存在就引起了传热、做功、传质、导电、化学及物理化学变化等能量转移,并同时使热力系状态不断变化。因而,每一种平衡将对应某一种不平衡势的消失。当驱使系统状态变化相应的所有的不平衡势都不存在时,系统就维持在平衡状态。

对于一个开口系,当有工质不断流进系统并同时也有工质由系统流出时,系统内的工质在不断更新。对微元工质来说,在其流过开口系时状态在不断变化。若单位时间流入和流出的工质量相等,单位时间的功量和热量交换不变,并保持进口、出口截面的参数不变的话,则对开口系空间区域的每一点来说,状态不随时间而变。这种流动就是稳定流动。这时,对微元流体来说,流过空间的每一点时都是平衡和均匀的。但整个系统不处于平衡态,亦不是参数处处均匀的均匀系。一般来说,平衡与否是对工质而言,稳定是对流动而言。

对于开口系统,只要有一个参数随时间而变就是不稳定流动。举例来说,蒸汽轮机起动过程的每一阶段工质的流量是不变的,但其温度分布随时间而变,这就是不稳定流动。但这种不稳定流动不属变质量系统热力学研究范围,变质量系统热力学所研究的不稳定流动则必须是系统质量发生变化的情况。这时往往是只有工质流入系统,或者只有工质流出,或同时有工质流入和流出但流入和流出的质量不等。这种开口系是不稳定流动系,工质状态亦不平衡,但局部平衡的概念对其也是适用的。

1-3 热 力 系 统

研究各种热力学问题时,显然,首先应根据具体问题的性质,以一定的方式从参与变化的所有物体中区分出研究对象,并要确

切地表征出所研究的物体处在什么状态下, 以及它与其他物体间有怎样的相互作用。所区分出来的待研究的物体或具有一定宏观尺寸的几何体积内所容的物质就称为系统, 而围绕它的一切外部物体统称为外界(或称为环境)。将系统和外界分隔开来的是边界面, 系统和外界的相互作用要通过边界面才能进行。因而, 相互作用的形式和强弱取决于分界面的结构。热力学研究方法的特点是只根据系统的特性来研究外界和系统之间的相互作用以及这些相互作用对系统的影响。

通常, 按热力系统与外界的相互作用的情况来把热力系分类。封闭系与外界仅交换能量而不交换物质。开口系与外界既可交换能量也可交换物质。若系统与外界既没有能量交换, 也没有物质交换, 这种系统就叫孤立系。本书则视系统中质量是否改变来把系统分类, 对系统中质量不变的称常质量系统, 系统质量变化的就称变质量系统。常质量系统主要涉及的是没有化学变化的封闭系和稳定流动的开口系。变质量系统则主要研究的是不稳定的开口系。当封闭系中有化学反应和相变时, 虽然对整个系统来说是常质量, 但对其中每一组元或相来说, 也是一个变质量系统。

类似于力学中研究“变质量质点系”方法, 在研究变质量热力系时, 假定:

(1) 微元工质进入系统之前和从系统离开之后, 它们所发生的一切与所研究的变质量热力系统无关。

(2) 微元工质从进入系统的瞬时起, 即属于系统的一部分, 与其他工质一样参与系统的状态变化。

对于只有工质流入的对刚性容器的充气和只有工质流出的自刚性容器的放气, 则可视为每充入或放出微元流体, 系统均可在新的外界条件下达于相应的平衡状态。此时, 系统也是均匀的。微元工质充入后即与系统中原来的工质处于同一状态, 流出时工质