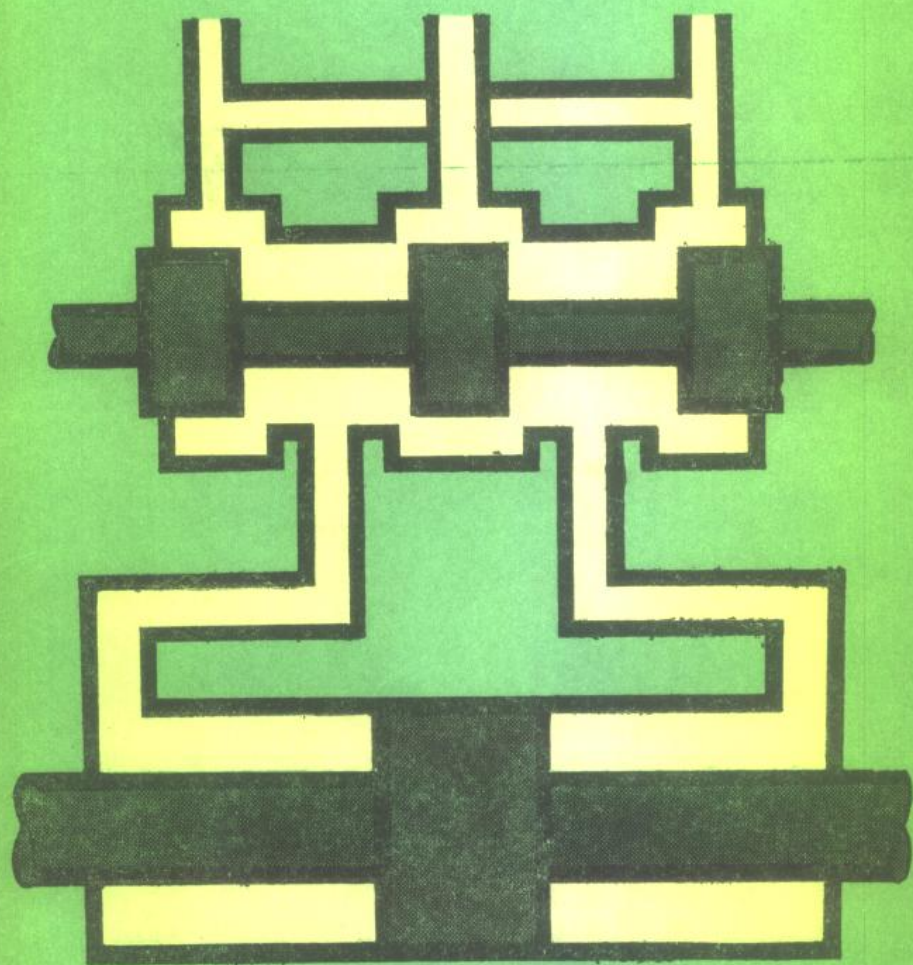


高等院校教材

气压传动 与控制

陈汉超 盛永才 编著



北京工业学院出版社

高等院校教材

气压传动与控制

陈汉超 盛永才 编著

北京工业学院出版社

内 容 简 介

本书介绍了气压传动与控制的基本理论。研究了气压传动与控制系统中各类元件的工作原理和特性,其中着重讲述了气缸特性的分析方法,研究了滑阀式、喷嘴-挡板式、射流管式气动伺服阀的特性和设计方法。介绍了典型气压传动和伺服系统的分析、设计方法,其中着重介绍了脉宽调制式气动系统性能的计算方法。在气源方面,讨论了由压缩机供气、气瓶供气和由燃气发生器供气的气源系统以及选用、设计这些系统的方法。

本书适合作高等院校流体动力传动与控制专业的教材,也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

本书经原兵器工业部第一教材编审委员会液压气动小组审定并推荐作为部统编教材。

气 压 传 动 与 控 制

陈汉超 盛永才 编著

✱

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县向阳印刷厂印刷

✱

787×1092毫米 16开本 17.25印张 427千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数: 1-5000册

统一书号: 15434·62 定价: 2.90元

前 言

气压传动与控制系统是流体动力控制系统中的一个重要分支,在各工业部门都有广泛的应用。

本书是根据原兵器工业部教材编审委员会审定的大纲编写的,是流体传动与控制专业的专业教材之一。

本书共分八章,第一、二章介绍与本书有关的工程热力学和气体动力学知识,这是研究气体在管内流动的理论基础。对于未设这两门基础课的专业,这两章的内容是必不可少的;第三、四章介绍气压传动系统中的主要元件和传动回路的设计;第五、六章是在对气动伺服阀作了一般分析的基础上,研究常见的几种伺服阀的各种特性,并提出了设计这些阀的基本方法;第七章是系统分析,着重介绍了两种气动伺服系统(模拟系统和脉宽调制系统)的分析方法;第八章讨论了三种气源系统及其选用和设计方法。

本书在介绍了气体流动基本理论的基础上,较深入地分析了气压传动和伺服控制中的一些基本理论问题(如节流理论,定容充、放气理论,串联合流器的特性等),特别是着重研究了气缸的特性、各种气动伺服阀的特性和设计方法。在研究中,广泛地采用了无因次特性法,并尽可能地用曲线形式给出直观结果。在系统中,介绍了典型气压传动系统和伺服系统的分析设计方法,其中着重介绍了脉宽调制气动伺服系统性能的计算分析方法。在气动能源方面,本书介绍了压缩机供气、气瓶供气和燃气发生器供气三种气源系统,其中着重介绍了由贮气瓶供气和由燃气发生器供气的基本问题及设计方法。从总体上看,本书兼顾了传动和伺服控制两个方面,但以伺服控制为主;兼顾了一般介绍和性能分析两个方面,但以性能分析为主。特别是用了无因次特性分析法以后,所得的公式和结论具有普遍意义。因此,本书除适合作专业教材外,也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

本书由陈汉超主编,其中第三、四章由盛永才编写,其余各章由陈汉超编著。

本书由徐炳辉副教授主审。上海工业大学流控教研室的同志对本书提出了不少宝贵意见。同时,在编写过程中,得到了北京工业学院气动研究室许多同志的大力支持和帮助。在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,实践经验不足,书中难免有错误和不妥之处,请读者批评指正。

编 者 1986年9月

目 录

第一章 气体的基本热力性质	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 理想气体的状态方程	(6)
第三节 热量·功·内能·热力学第一定律	(9)
第四节 气体的比热容	(16)
第五节 理想气体的内能·焓和熵	(18)
第六节 混合气体	(21)
第七节 理想气体的热力过程	(27)
第二章 气体一维定常流动	(35)
第一节 基本方程	(35)
第二节 一维等熵气体动力学函数·临界参数·速度系数	(39)
第三节 等熵变截面管流	(44)
第四节 节流器	(51)
第五节 固定容器的充气 and 放气	(54)
第三章 气压传动系统中的主要元件	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 气缸	(62)
第三节 压力控制阀	(82)
第四节 方向控制阀	(93)
第五节 逻辑元件	(100)
第四章 气压传动回路的设计	(105)
第一节 气动基本回路	(105)
第二节 行程程序控制回路的设计	(115)
第五章 气动伺服阀的一般分析	(131)
第一节 气动伺服阀的分类	(131)
第二节 气动伺服阀压力-流量特性的一般分析	(134)
第三节 阀的压力特性·起始压力和压力灵敏度	(142)
第四节 阀的流量特性和流量放大系数	(148)
第五节 压力-流量特性的线性化·阀系数	(150)
第六节 阀的耗气量·输出功率及效率	(153)
第七节 气缸腔内工作过程的动态分析	(154)
第六章 几种典型气动伺服阀的分析	(157)
第一节 三通阀的分析	(157)
第二节 四通阀的分析	(167)

第三节	气动滑阀阀芯的受力分析·····	(185)
第四节	四通滑阀的设计·····	(194)
第五节	喷嘴-挡板阀的特性分析 ·····	(198)
第六节	射流管阀的分析·····	(212)
第七章	气动控制系统·····	(223)
第一节	概述·····	(223)
第二节	射流管式电气-气动伺服系统 ·····	(223)
第三节	带有瞬态压力补偿的气动伺服系统·····	(228)
第四节	脉宽调制气动伺服系统·····	(232)
第八章	气动能源·····	(246)
第一节	由空气压缩机供气的气动能源·····	(246)
第二节	由贮气瓶供气的气动能源·····	(254)
第三节	热气能源·····	(262)
主要参考文献	·····	(269)

第一章 气体的基本热力性质

在气压传动和控制系统中，都是用压缩气体作工质来传递和转换能量。由于气体的分子结构与液体或固体的不同，在能量的传递和转换过程中，气体的性质(如密度、温度)要发生变化，气体的内能作为能量的一种形式要参与交换，同时伴随有热现象发生。所以在学习本课程之前，必须了解气体性质变化的规律。

这一章的目的是将本课程涉及到的工程热力学知识(主要是气体的热力性质)作一简单介绍，使未学过工程热力学的同志在学习后面各章节时不致产生困难。

第一节 基本概念

一、热力系统

气体在吸热、放热及热能与机械能的转换过程中表现出来的性质，叫做气体的热力性质。研究气体的热力性质，就必须把气体作为研究对象。在热力学中，把作为研究对象的某指定范围内的物质称为热力系统，简称系统或体系。系统之外的物质称为外界。系统与外界之间的分界面称为边界。系统的边界可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是尺寸、形状变化的或者运动着的。所谓热力系统，就是由边界包围着的被研究物质的总和。

通常，系统与外界之间可能有物质交换和能量交换，这种交换称为系统与外界之间的相互作用。按系统与外界有无质量交换，可将系统分为两类。

闭口系统：系统与外界之间有能量交换而无质量交换。在闭口系统中，没有物质穿过界面，系统内部物质质量维持不变，所以又称为“控制质量”。

开口系统：系统与外界之间既有能量交换，也有质量交换。开口系统有物质通过界面，系统内部的质量可以不变，亦可是变化的。对这种系统，边界所规定的是系统所占有的空间范围，所以又称为“控制容积”或“控制体”。

按照热力系统与外界进行能量交换的情况，又可将系统分为三类。

简单系统：系统与外界只交换热量和一种形式的功。如由可压缩流体组成的系统(称为可压缩系统)，除与外界有热交换外，只与外界有膨胀功和压缩功的交换，因此是简单系统。在本课程里，都是研究这种简单可压缩系统。

绝热系统：系统与外界没有热交换。

孤立系统：系统与外界既无能量交换又无物质交换。

在实际系统中，没有完全绝热的边界材料，也不可能使任何系统完全不和外界发生作用，所以，绝对绝热系统和孤立系统是不存在的。这两种系统都是略去了次要因素，抓住事物的本质而概括出来的抽象概念，应用这两个概念可以使研究得到简化。

另外，有时会遇到一些特殊的热力系统，如从系统中取走有限的热量而不改变它自身的温度，这种热力系统称为“热库”或“热源”。相反，向它放热而不改变其温度的热力系统称为

“冷源”。

二、状态及状态参数

在用可压缩气体来传递能量的过程中，工质本身的状况要不断地发生变化，要知道能量传递的大小和规律，就必须研究由工质所组成的系统在变化过程中的状况。热力系统在某瞬时所呈现的宏观物理状况称为系统的状态。用来描述系统所处状态的一些宏观物理量（如压力、温度等）称为状态参数。若系统由工质组成，则又将系统的状态参数称为工质的状态参数。

一个热力系统，可能有不同的宏观状态存在，但不是任何情况下都可用确定的状态参数来描述。如系统内部的温度、压力不一致，就无法用统一的状态参数来描述系统的内部状态，这种状态称为不平衡状态。处于不平衡状态下的系统，其内部各点之间一定存在着传热和相对位移。若没有外界影响，随着时间的推移，各点之间将达到热平衡和力平衡，各部分参数将达到一致，不再随时间变化。在没有外界影响下，系统的宏观状态不随时间而改变，称此为平衡状态。处于平衡状态下的系统（称为平衡系统），就可以用确定的状态参数来描述。

常用的状态参数有六个：温度、比容、压力、内能、焓和熵。其中前三个参数可以测量，称为基本状态参数，其它的状态参数可以根据基本状态参数算得。这里先介绍基本状态参数，其余的后面再介绍。

（一）温度

从宏观来讲，温度是表征物体的冷热程度。从微观来讲，温度是物体分子热运动平均动能的量度。温度的高低反映了分子热运动的强弱。

一般根据热平衡原理，用比较方法来测量温度。即将一个物体取作标准（称为测温质），与被测物体接触，使保持热平衡，并选定某平衡状态为起点。这时，当热平衡状态发生变化时，测温质的性质将发生变化，将此变化加以分度就是被测物体的温度。根据这个原理，国际上出现了各种不同的温度数值表示方法——温标，常用的有以下几种：

1. 摄氏温标：以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示，它规定：在标准大气压下，以纯水的冰点作为 0°C ，沸点作为 100°C ，而且假设测温质的性质与温度成简单的线性关系，在 $0-100^{\circ}\text{C}$ 之间等分为 100 份，每份称为 1°C 。

2. 华氏温标：以符号 $^{\circ}\text{F}$ 表示，它是以冰和盐的混合物作为 0°F ，纯水的冰点为 32°F ，沸点为 212°F ，冰点和沸点间等分为 180 等份，每份称为 1°F 。

3. 兰氏温标：以符号 $^{\circ}\text{R}$ 表示，它取纯水的冰点为 0°R ，沸点为 80°R ，其间等分为 80 等份，每份称为 1°R 。

以上三种温标有一个共同的缺点，就是所测得的温度将依赖于测温质的选择。因为，若假定了某种测温质的性质与温度成线性关系后，另一种测温质的性质不一定也与温度成线性关系。例如，选定水银的体积变化与温度成线性关系时，金属丝的电阻变化与温度不可能成线性关系。为了克服这一缺点，1954年由开尔文建议使用绝对（热力学）温标，又称开氏温标。

4. 开氏温标（热力学温标、国际温标）：用符号 K 表示，它是以热能作为定温标准，用近乎理想的气体，根据盖·吕萨克定律来标定温度。因为，这个定律是所有理想气体都遵守的，所以测得的温度与测温质的性质无关。开氏温标规定了一个固定点，即规定摄氏零度为

273.15K，分度方法与摄氏温标相同。这样，开氏温标与摄氏温标的关系为

$$T = 273.15 + t \quad (1-1)$$

式中 T ——开氏温度 K ；

t ——摄氏温度 $^{\circ}C$ 。

以上几种温标之间的换算关系见表 1-1。

几种温标的换算关系

表 1-1

	$^{\circ}C$	K	$^{\circ}F$	$^{\circ}R$
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$K - 273.15$	$\frac{5}{9}(^{\circ}F - 32)$	$\frac{5}{4}^{\circ}R$
K	$273.15 + ^{\circ}C$	K	$\frac{5}{9}(^{\circ}F + 459.67)$	$\frac{5}{4}^{\circ}R + 273.15$
$^{\circ}F$	$\frac{9}{5}^{\circ}C + 32$	$\frac{9}{5}K - 459.67$	$^{\circ}F$	$\frac{9}{4}^{\circ}R + 32$
$^{\circ}R$	$\frac{4}{5}^{\circ}C$	$\frac{4}{5}(K - 273.15)$	$\frac{4}{9}(^{\circ}F - 32)$	$^{\circ}R$

1984年，我国已将开氏温标正式定为法定温度计量单位。

(二) 比容

比容就是单位质量物质所占有的容积，用 v 表示。从微观上讲，它反映气体分子的平均密度。对于一个平衡系统，它表示为

$$v = \frac{V}{m} \quad m^3/kg \quad (1-2)$$

式中 V ——气体所占的体积 m^3 ；

m ——气体的质量 kg 。

比容的倒数称为密度，用 ρ 表示，即单位容积所具有的质量。

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad kg/m^3 \quad (1-3)$$

(三) 压力

压力(又称压强)是作用在单位面积上的法向力，用 p 表示。从微观上讲，它是大量分子在紊乱的热运动中对单位容器面积频繁撞击的平均效果。因此，气体的压力既取决于分子的平均平动动能，又取决于分子的平均密度。

在法定计量单位中，压力的单位为帕斯卡，简称帕，用符号 Pa 表示。其含义为：1平方米的面积上垂直均匀作用1牛顿的力。

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

式中 A ——面积 m^2 ；

F ——作用在 A 面积上的均匀法向力 N 。

除此以外，常用的压力单位还有巴(bar)、工程气压(at)、物理气压(atm)、毫米汞柱($mmHg$)等，它们之间的换算关系如表 1-2 所示。

状态参数也可以用坐标图表示。对于简单可压缩系统，实验和理论都证明，只要用两个

几种压力单位的换算

表 1-2

	帕 斯 卡 $P_a = \text{N/m}^2$	巴 bar	工 程 气 压 at = Kgf/cm ²	物 理 气 压 atm = Kgf/cm ²	毫 米 汞 柱 mmHg
P_a	1	10^{-5}	1.0197×10^{-5}	0.9869×10^{-5}	0.007501
bar	10^5	1	1.0197	0.9869	750.1
at	98066.5	0.980665	1	0.9678	735.6
atm	101325	1.01325	1.0332	1	760
mmHg	133.5	0.00133	0.00136	0.00131	1

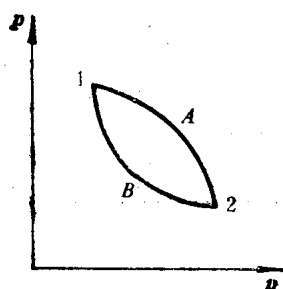


图 1-1 p - v 图

独立参数就可以确定其状态，因而可用平面直角坐标系。如图 1-1，纵坐标为压力 p ，横坐标为比容 v ，坐标平面上的每一点都代表一个平衡状态，称此图为 p - v 图。不平衡状态没有确定的状态参数，不能在状态参数坐标上表示。

状态参数的特性：状态参数是状态的单值函数，只要系统内工质的状态一经确定，对应状态参数的值也就确定了，而与达到此状态所经历的变化过程无关。从数学上说，状态参数是一个态函数。若设 x 为任意一状态参数，则它具有

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-5)$$

$$\oint dx = 0 \quad (1-6)$$

如图 1-1 所示，若工质经历 A、B 两个不同的过程，从 1 状态变化到 2 状态，则其压力变化是相等的，即

$$\int_1^2 dp = \int_1^2 dp = p_2 - p_1$$

A B

当系统工质经一系列状态变化后又回到初始状态，则其压力变化为零。

$$\oint_{1A2B1} dp = 0$$

这就是状态参数的数学特性。

按其数值是否与系统内工质的质量有关，可将状态参数分为两类：凡与工质质量的多少无关的状态参数，称为强度参数，如压力、温度等。这类状态参数不具有可加性，如 1kg 工质的压力为 1Pa，2kg 工质的压力并不等于 $2 \times 1\text{Pa}$ 。如果是不平衡状态，系统内各点的强度参数不同，故整个系统的强度参数没有一个确定的值。只有在平衡状态时，系统的强度参数才有确定的值。凡与工质质量有关的状态参数，称为广度参数，如容积、内能、焓、熵等。这类参数具有可加性，即 1kg 工质的容积为 v_i ， m kg 的容积为 $V = mv_i$ 。另外，单位质量的广度参数具有强度参数的性质，比如容 $v = V/m$ 、比焓 $h = H/m$ 等。

三、热力过程·准平衡过程和可逆过程

热力系统从一个状态连续地变化到另一个状态，它所经历的全部过程称为热力过程，简

称过程。实际的热力过程是很复杂的，为了便于理论分析和计算，需要建立某些理想化了的物理模型，即以下讨论的准平衡过程和可逆过程。

准平衡过程：如图 1-2 所示气缸活塞装置，设气缸壁与活塞都是由绝热材料制成的，缸内气体只通过易于导热的气缸头部与热源交换热量。现取缸内气体作为系统。在初始时，气体内部参数均匀，且与热源的温度相同，气体对活塞的作用力等于作用在活塞上的外力 R 。即系统内部处于平衡状态，且与外界达到热和力的平衡。在这种情况下系统将保持其平衡状态不变。若外界条件发生变化，设以更高温度的热源与气缸头部接触，同时减小外力 R 。这时系统与外界之间出现不平衡，将使两者相互作用(传热与做功)，进而导致系统内部的不平衡。

当系统吸热时，接近缸头的气体首先被加热，这里的温度比其它部分高；当系统膨胀时，活塞附近的气体首先膨胀，这里的压力比其它部分低。要使系统各部分的温度和压力重新达到一致，需要一定的时间。系统自平衡状态被破坏后，自发地过渡到一个新的平衡状态所需要的时间称为弛豫时间。

如果过程进行得很快，在系统达到新的平衡状态以前，边界附近的状态参数又接连发生了新的变化，这样，除了始、末状态以外，过程进行中的每一瞬间，系统各部分的状态参数都是不均匀的，即系统是不平衡的。这样的过程称为不平衡过程。

若在一瞬间，热源与气体间的温差及活塞两边的力差均为无限小，则外界与系统间的热交换速度和活塞移动的速度均无限慢。这样，边界上的温度和压力变化便来得及传向整个系统，使系统内各部分的温差和压力差都无限小，那么，系统的状态随时都接近于平衡状态。把这种系统经历的一系列状态都接近于平衡状态的过程称为准平衡过程或准静态过程。由此可见，要维持准平衡过程的条件是：推动过程进行的不平衡势(温差、力差)要无限小，即过程进行得无限慢。但任何实际过程都是以有限速度进行的，因此，严格地说，任何实际过程都是不平衡过程。不过在气动控制系统中，一般的控制阀和活塞式机构，机械运动的速度通常不超过 10m/s ，而气体内部压力波的传播速度每秒达数百米，分子热运动的平均速度也达每秒百米以上。因此，在工作时气体能够及时地建立一系列力平衡和热平衡，可以把气动系统中的热力过程看成是准平衡过程。

对于准平衡过程，其每一个状态都可看成是平衡状态，因此有确定的状态参数。这样，准平衡过程就可用一个随时间连续变化的状态参数来描述，这为研究热力过程带来很大的方便。

可逆过程和不可逆过程：参看图 1-3 所示活塞气缸飞轮装置，取气缸中的工质作为系统。工质由热源吸热并膨胀做功，从状态 A 开始，经历一准平衡过程 A-1-2-3-4-B。在过程中，工质的温度与热源温度随时相等或只相差一个无限小。这样，过程随时可以逆向进行，使外力压缩工质，同时向热源放热。设机器是理想的，没有摩擦损失，则当完成此过程后，工质所作的功全部以动能的形式存于飞轮之中。若此时利用飞轮的动能来推动活塞逆行，完成一准平衡的压缩过程 B-4-3-2-1-A，那么，压缩过程所需要的功与原来膨胀过程所产生的功相等。此外，工质被压缩的同时向热源放热，放热量与膨胀时吸收的热量相等。这样，工质恢复到状态 A 时，机器、热源也都恢复到了原来的状态，此即准平衡过程具有的

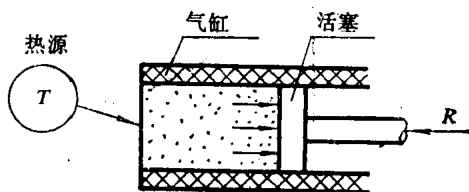


图 1-2 准平衡过程例图

可逆性。

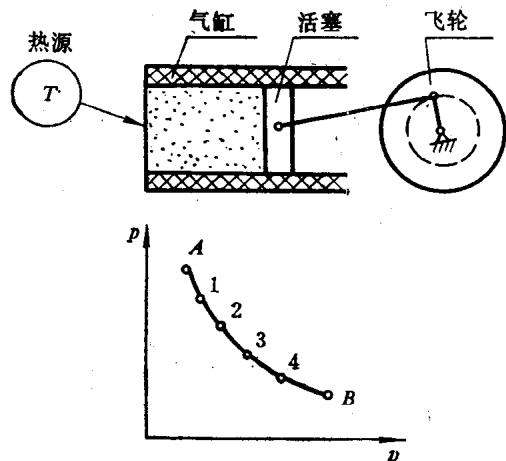


图 1-3 可逆过程例图

复到原始状态，不留下变化，则此过程称为可逆过程。反之，如果没有这种可能，则叫做不可逆过程。

由上述可见，实现可逆过程的条件是：

1. 过程进行中，系统内部、系统与外界之间以及过程所涉及到的外界各物体之间，热与力的不平衡应无限小，即过程应是准平衡过程。
2. 过程中不存在耗散效应。如摩擦、非弹性变形以及电流经电阻等使功不可逆地转变为热的现象。

如果不考虑摩擦等耗散效应，准平衡过程一定是可逆过程。所以，平衡和可逆两个概念并无实质上的区别，前者针对过程中工质内部性状，而后者则针对过程对系统引起的效果。当讨论的对象不仅限于工质内部时，可逆这一概念更为适当。

第二节 理想气体的状态方程

由气体物质组成的简单系统，在平衡状态下三个基本状态参数间的函数关系，称为气体的状态方程。一般可表示为

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-7)$$

或写成某一个参数的显函数形式

$$p = f(T, v), \quad T = f(v, p), \quad v = f(p, T)$$

自然界存在的各种实际气体，状态参数之间存在着很复杂的函数关系，至今还没有找到能普遍适用的状态方程。根据分子运动理论，气体的宏观性质取决于气体分子热运动的情况。而气体分子的热运动不但与分子的密度和运动强度有关，而且还与气体分子本身的体积和分子之间存在的相互作用力有关。但在一般情况下(如常温常压)，分子本身的体积与其运动空间相比是非常小的，分子间的作用力也极其微弱。因此，研究分子运动时，可将它们忽略，提出一种理想气体的模型，即“理想气体是一种假想的气体，它的分子是一些弹性的、不占据体积的质点，分子之间除了相互碰撞外，没有相互作用力。”这种理想气体模型不但简化了对气体微观运动的理论研究，而且为大量宏观实验所证实。工程上所用的多数气体，在一般

情况下用理想气体模型导出的结论都是足够准确的。对一些特殊情况(如压力较高、温度较低),也是用理想气体模型去研究,然后进行修正。在本书里除高压气源要考虑修正外,其余按理想气体考虑。

根据实验,在平衡状态下,理想气体三个基本状态参数之间保持着一个简单的关系,这就是理想气体状态方程。

$$pv = RT \quad (1-8)$$

这个方程也称为克拉珀龙方程,式中 R 叫做气体常数。因此,也可说:完全遵守克拉珀龙方程的气体叫做理想气体。

气体常数的单位随状态方程中各参量所采用的单位不同而不同,其数值也随单位而异。

在法定计量单位中,压力单位为 $\text{Pa}(\text{N/m}^2)$,比容单位为 m^3/kg ,温度单位为 K ,相应气体常数的单位为

$$[R] = \frac{[p][v]}{[T]} = \frac{[\text{N/m}^2][\text{m}^3/\text{kg}]}{[\text{K}]} = \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

在工程单位制中, R 的单位为

$$[R] = \frac{[p][v]}{[T]} = \frac{[\text{kgf/m}^2][\text{m}^3/\text{kgf}]}{[\text{K}]} = \left[\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf} \cdot \text{K}} \right]$$

每一种气体都有自己的气体常数值,为了计算气体常数,需要涉及物质量的单位——千摩尔。

“摩尔”(mol)是物质量的计量单位,规定物质结构中所含粒子(包括原子,分子,离子,光子等)数与 0.012 千克碳-12 的原子数目 (6.023×10^{23} ——阿佛加德罗常数)相等的物质质量称为 1 摩尔。简称摩,单位符号为 mol。热力学计算中常用摩尔的一千倍作为单位,称为千摩尔(kmol)简称千摩。如果以 kg 为单位,1 千摩尔气体质量,其数值正好等于它的分子量,称为千摩质量,用符号 M 表示,单位为 kg/kmol 。如氮气的分子量为 28,则其千摩质量 $M = 28 \text{ kg}/\text{kmol}$ 。若有 m 公斤气体,相应的千摩尔数 n 为

$$n = \frac{m}{M} \quad \text{kmol} \quad (1-9)$$

1 千摩尔气体具有的容积称为千摩容积,用 V_m 表示,其单位为 m^3/kmol 。它的数值等于千摩质量乘以比容

$$V_m = Mv = M \frac{V}{m} = \frac{V}{n} \quad (1-10)$$

式中 V 为 $m \text{ kg}$ 气体所占有的容积。阿佛加德罗定律指出:同温同压下相同容积的任何气体都有相同数目的分子。因为 1 千摩尔任何气体的分子数相同,所以在同温同压下任何气体的千摩容积都相等。由实验测得,在标准状况下($p_B = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$, $T_B = 273.15 \text{ K}$)各种气体的千摩容积都近似等于 $22.414 \text{ m}^3/\text{kmol}$ 。由公式(1-10)可知,在同温同压下,有相同千摩尔数的各种气体,具有相同的体积。

有了千摩质量的概念,可以计算 R 。

对于 1 kmol 质量理想气体的状态方程为

$$pMv = MRT$$

或

$$pV_m = R_m T \quad (1-11)$$

在同温同压下, 任何气体的 V_m 相等, 所以 R_m 对任何气体都是相同的, 称为通用气体常数。可按标准状态算出 R_m 的值为

$$\begin{aligned} R_m &= MR = \frac{p_B V_m}{T_B} = \frac{101325 \times 22.414}{273.15} \\ &= 8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K} = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

在一些旧书中用到工程单位制, 此时 $p_B = 10332 \text{ kgf/m}^2$, 其它单位相同, 则

$$R_m = \frac{10332 \times 22.414}{273.15} = 848 \text{ kgf} \cdot \text{m/kmol} \cdot \text{K}$$

利用 $R = R_m / M$ 可以求得各种气体的气体常数, M 的数值等于气体的分子量。表 1-3 列出了常见的几种气体的 R 值。

几种常见气体的 R 值

表 1-3

气体名称	化学符号	分子量	R	
			法定单位制 (J/kg · K)	工程单位制 (kgf · m/kgf · K)
氢	H ₂	2	4.157×10^3	424
氮	N ₂	28	0.297×10^3	30.29
氦	He	4	2.0785×10^3	212
氧	O ₂	32	0.260×10^3	26.50
空气		28.96	0.287×10^3	29.28
一氧化碳	CO	28	0.297×10^3	30.29
二氧化碳	CO ₂	44	0.189×10^3	19.27

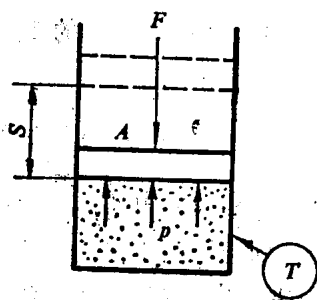


图 1-4 R 的物理意义

可以这样来理解气体常数的物理意义: 气体常数 R 是 1 kg 气体在等压下加热, 当温度升高 1 度时, 气体膨胀所作的功。证明如下:

如图 1-4 所示, 在一初始体积为 V_1 的容器中盛有 1 kg 气体, 活塞上作用的力 F 不变, 活塞面积为 A 。当加热时, 其容积必然增加, 当容积增加到 V_2 时, 活塞行程为 s , 若不考虑摩擦, 此时气体作的膨胀功 W 为

$$\begin{aligned} W &= F \cdot s = p A s = p (V_2 - V_1) \\ &= R (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

所以

$$R = \frac{W}{T_2 - T_1} \quad (1-12)$$

当 $T_2 - T_1 = 1$ 时, $R = W$, 结论得证。

第三节 热量·功·内能·热力学第一定律

系统与外界的能量交换是通过传递热量和做功来进行的。在此同时，系统内部工质的能量也要发生变化，热力学第一定律就是确定这些能量相互转换关系的基本定律。在这一节里，首先建立热量、功、内能等几个能量的基本概念，然后再叙述热力学第一定律。

一、热量

在日常生活中，当两个温度不同的物体接触时，高温物体的温度会逐渐降低，低温物体的温度则逐渐升高。这时，我们说有热量传递。在热力学中对热量作如下定义：仅仅由于温度不同，在系统和外界之间穿越边界而传递的能量称为热量。从微观上看，热量是通过物体相互接触处的分子碰撞或以热辐射方式所传递的能量。传递过程中，物体并不发生宏观运动。

必须注意的是：热量是系统与外界之间传递的能量，而不是系统本身具有的能量。因此，只有在传热过程中才能说系统得到(或失去)了多少热量，而不能说系统在某状态下具有多少热量。传热量的大小不仅与传热过程中系统的初始与终结状态有关，而且与传热过程的具体特征有关。因此热量不是一个状态量，而是一个过程量，即热量不是态函数，没有全微分。为了与微分(微增量)区别起见，对于微小热量则用 δQ (不用 dQ)表示。对于有限过程的热量也借用积分符号，但不能写成

$$\int_1^2 \delta Q = Q_2 - Q_1$$

而只能写成

$$\int_1^2 \delta Q = Q \quad (1-13)$$

1kg 工质与外界交换的热量用 q 表示

$$q = \frac{Q}{m} = \int_1^2 \delta q \quad (1-14)$$

热力学中规定：系统接受热量(吸热)时， Q 取正值，系统向外界放热时， Q 取负值。

在法定计量单位中热量采用能量单位焦耳(J)，实用中常用千焦(kJ)。1kg 质量与外界交换热量的单位为 J/kg 或 kJ/kg。

工程上也常用千卡(大卡)作为热量单位，代号为 kcal。它与千焦的换算关系为

$$1\text{kcal} = 4.1868\text{kJ}$$

$$1\text{kJ} = 0.23884(\text{kcal})$$

二、功

在力学中力的功的定义是：力对物体所作的功等于物体受到的力 F 与在力的方向上微小位移 dx 的乘积，用 δW 表示

$$\delta W = F dx \quad (1-15)$$

当物体从 1 位置移到 2 位置时，完成的总功为

$$W = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 F dx \quad (1-16)$$

在过程进行时, F 通常是随 x 变化的, W 随 F 与 x 的函数关系不同而不同。因此, 功也是一个过程量, 而不是一个状态量, 只有过程进行时才表现出功量来。所以功的记法与热量一样, 用 W 表示有限过程的功量, 用 δW 表示微小量(不是增量)。

但是, 并不是在任何情况下都能容易地找出与功有关的力和位移, 特别是在热力学中, 希望将功与热力系统的状态和过程联系起来, 因此, 需要建立一个具有普遍意义功的定义。在热力学中, 功的定义是: 功是系统与外界相互作用而传递的能量。当系统完成功时, 它对外的全部作用, 可用在外界举起重物的效果来代替。在这个定义里, 首先说明功是一种“传递的能量”, 其次说明它并不一定表现为“力与位移的乘积”, 而只是在过程中产生的效果相当于(可折算为)举起重物(力与位移的乘积)。这个定义对热能、电能、磁能做功都适用, 具有普遍意义。

功与热量都是系统通过边界与外界相互作用传递的能量。但是, 这两种能量有本质的区别, 功是系统与外界通过宏观的运动发生相互作用而传递的能量, 而热量则是系统与外界通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

在法定计量单位中, 功的单位为焦耳或千焦, 在工程单位制中, 用公斤力·米(kgf·m)。它们的换算关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ kJ} &= 101.972 \text{ kgf} \cdot \text{m} \approx 102 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\ 1 \text{ kgf} \cdot \text{m} &= 9.80665 \times 10^{-3} \text{ kJ} \approx 9.807 \times 10^{-3} \text{ kJ} \end{aligned}$$

热力学中规定: 系统对外界作功, 功取正值, 外界对系统作功, 功取负值。

热力学中常见的一种功是容积变化功。由气态工质组成的简单可压缩系统, 当其反抗外力膨胀时, 与外界交换的功称为膨胀功。相反, 在外力作用下, 系统被压缩时, 与外界交换的功称为压缩功。这两种功统称为容积变化功或容积功。

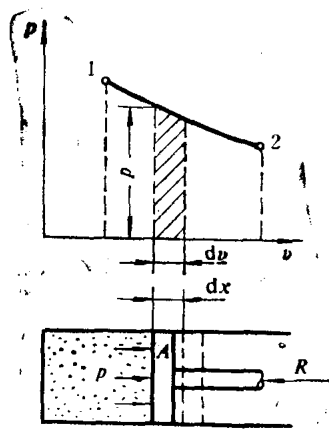


图 1-5 容积变化功计算图

气体的容积变化可以在任何情况下进行, 只要反抗外力(或在外力作用下)发生了容积变化就有功输出。因此, 不论是限制在容器里的气体还是流动的气体微团, 只要进行的过程是准平衡过程, 各种情况下的系统容积变化功的计算都具有相同的形式。这样, 可以选择任意有容积变化的热力系统模型来研究容积变化功。现选图1-5所示的气缸内的气体作为系统模型。设气缸中盛有 $m \text{ kg}$ 气体, 活塞是系统的一个可移动的边界, 活塞所受的外力为 R 。当系统克服外力进行一个准平衡膨胀过程, 由 1 状态变化到 2 状态时, 系统将对外输出功。若不计摩擦, 系统在整个过程中对外所作的功为

$$W = \int_1^2 R dx = \int_1^2 p A dx = \int_1^2 p dV = m \int_1^2 p dv \quad (1-17)$$

1 kg 工质所作的功为

$$w = \frac{W}{m} = \int_1^2 p dv \quad (1-18)$$

这就是任意准平衡过程容积变化功的表达式。只要知道过程方程 $p=f(v)$ 及过程的始末状态,就能算出过程功。这就把功量与状态量、过程量联系起来了。当工质膨胀时, $dV>0$,功量为正,说明工质对外做功,当工质受压缩时, $dV<0$,功量为负,说明外界必须对工质做功。在 $p-v$ 图(或 $p-V$ 图)上,功量正好是过程曲线下的面积。可见,尽管始末状态相同,若过程曲线不同功量也不同。这再一次说明功量不是一个状态量而是一个过程量。

在应用(1-17)和(1-18)两式来作实际计算时,要注意以下三点:

1. 公式是在准平衡过程下得到的,对于不平衡过程(如突然压缩和膨胀)不能用这两式来作功量计算。因为在不平衡过程中,状态量和过程方程都是不确定的。不平衡过程功量的计算只能借助于外界表现出来的参数(如位移和力)来确定。

2. 对于准平衡过程,又不考虑摩擦损失,工质对外做功等于活塞的输出功,这时过程是可逆的。若考虑摩擦,工质的对外做功应等于活塞输出功与克服摩擦消耗的功之和,过程是不可逆的。这时活塞输出功的计算一般这样进行:先按可逆过程直接用工质状态参数计算过程功,然后再考虑摩擦等不可逆因素对计算结果加以修正。

3. 如果只计算工质对外界做功,则只要工质内部是准平衡过程就可用这两公式来计算,不必考虑外界发生的变化。

三、内能

功和热都是系统与外界交换的能量(称为迁移能)。然而系统内部还具有一定的能量(称为储存能)。一般说,储存于系统内部的能量称为内能(不包括在外力场作用下具有的宏观势能)。从微观来说,内能是与物质内部粒子的微观运动和粒子空间位形有关的能量。在工程热力学中,内能包括分子平动、转动、振动的动能、分子间由于相互作用力的存在而具有的位能。

由分子运动理论可知,内动能是工质温度的函数,而内位能是工质密度(比容)的函数。因此,一定量的气体内能 U 是温度和容积的函数

$$U=f(T, V) \quad (1-19)$$

1 kg 气体的内能 u 是温度和比容的函数

$$u=f(T, v) \quad (1-20)$$

根据状态方程(1-7),内能也可以写成

$$u=f(T, p) \text{ 和 } u=f(p, v)$$

如果是理想气体,分子间没有相互作用力,内位能为零,气体的内能只有内动能。这时,内能只是温度的单值函数

$$u=f(T) \quad (1-21)$$

内能的单位仍是焦耳(J)或千焦(kJ)。

四、热力学第一定律

人类在长期生产实践和大量科学实验的基础上总结出了能量转换与守恒定律:“自然界一切物质都具有能量。能量既不可能被创造,也不可能被消灭,而只能在一定的条件下从一种形式转变成另一种形式。在转变过程中,能量的总量恒定不变。”将这一定律应用于伴有热效应的物理化学过程就是热力学第一定律。它指出:“当热能与其它形式的能量进行转换