

高等学校教材

过程基础

朱云/编著



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



高等学校教材

过程基础

朱 云 编著

中国计量出版社

图书在版编目(CIP)数据

过程基础/朱云编著. —北京:中国计量出版社, 2006. 8

高等学校教材

ISBN 7-5026-2476-7

I. 过... II. 朱... III. 热力学过程 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 090502 号

内 容 提 要

本书着重介绍热力学、流体力学、传热学三门学科的最基本理论和方法。对这三门学科除了基本概念的介绍,热力学部分主要着重于第一定律、第二定律、理想气体典型过程和均匀介质相平衡的理论;流体力学部分介绍了流体静力学的基本理论 and 应用,运动流体力学着眼于介绍运动流体微分方程的建立及基本应用,以及流动阻力的分析和计算;传热学部分对热传导、对流换热、辐射换热主要介绍各自的基本计算方法。此外,本书还介绍了应用于控制的示例。

本书可供高等院校工业自动化专业师生及相关科技工作者参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010)64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 6.5 字数 162 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 15.00 元

前 言

《过程基础》是一门为工业自动化专业高年级学生开设的具有较强理论性的专业基础课程。通过学习本课程,可使本专业偏重过程自动化的学生对涉及自动化控制或检测的各种对象,尤其是存在于各行业的涉及流体的过程,在理论上有一定的认识;同时有助于系统工作数学模型的进一步建立以及学生对实施过程控制或测量技术知识的理解。

热力学、流体力学、传热学是三门兼具较强理论性和实际应用性的学科,课程的体系比较庞大。为了适应课程 50~60 学时的安排,这三门学科的内容势必应根据需要进行删减,但同时又要保证其本身应有的体系。本书的编辑就是这样一种尝试。

在本书中,着重介绍这三门学科的最基本理论和方法,以便学生对工业过程性质进行理论分析的基础方法有所了解。对这三门学科除了基本概念的介绍外,热力学部分主要着重于第一定律、第二定律、理想气体典型过程和均匀介质相平衡的理论;流体力学部分介绍了流体静力学的基本理论 and 应用,运动流体力学着眼于介绍运动流体微分方程的建立及基本应用,以及流动阻力的分析和计算;传热学部分则主要介绍了热传导、对流换热、辐射换热的基本计算方法。除此之外,本书还介绍了一些工业过程应用上述知识进行参数关系推导或建模的示例。

通过学习热力学、流体力学、传热学的基本理论,期望读者能对相关过程的基本性质有所了解。由于篇幅的关系,要求了解所介绍的基本知识在相应的工业领域中的作用,理解热力学、流

体力学、传热学的基本理论及其在工业过程中的应用方法，还需要读者在阅读中充分体会这些学科的理论、方法以及扩展对过程特性的理解。只有这样，才能真正掌握运用基本理论对对象所经历的过程进行分析研究的方法。

本书内容是否妥当，有待实践检验，编者诚恳地希望使用本书的教师和读者提出意见，以便改进。

朱 云

2006 年 7 月于杭州

目 录

第一章 热力过程基础	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 热力学第一定律	(8)
第三节 典型热力过程	(17)
第四节 热力学第二定律	(25)
第五节 纯物质的相平衡	(36)
习 题	(45)
第二章 流体力学基础	(53)
第一节 流体静力学	(53)
第二节 流体动力学的基本微分方程	(69)
第三节 边界层流动	(82)
第四节 流动阻力与管道计算	(88)
习 题	(106)
第三章 传热学基础	(113)
第一节 热传导	(113)
第二节 对流换热	(124)
第三节 辐射换热	(149)
习 题	(164)

第四章 应用于控制的示例	(171)
第一节 传热设备的控制	(171)
第二节 具有一阶特性的对象示例	(184)
第三节 具有二阶、高阶特性的对象示例	(193)
参考文献	(200)

第一章 / 热力过程基础

热力过程是工业过程中得到普遍应用的过程，无论是在能源工业、化学工业、产品制造业、农业，还是生物学、医学、国防科学、基础科学研究等领域，热力过程均是不可或缺的一种过程。分析热力过程的理论基础属于热力学的范畴。

第一节 基本概念

热力学的整个体系由基本概念、热力学基本定律、热力性质所构成，支撑该学科的理论基础为热力学第一定律、第二定律、热力学关系。热力学第零定律和第三定律涉及其他的一些学科，这里就不做介绍。而相关的基本概念则当首先介绍。

一、系统

1. 系统的定义

任何一个过程，均应有实施这一过程的主体。在生产实践中，人们通过某种方法把自己所关心的对象界定起来，再来研究这一对象的情况、性质，乃至对其进行描述并实现控制及优化。这样一个对象，被称为系统，而其余部分则被称之为外界或环境。

系统与外界的分隔是通过设定边界来得到实现的，而产生的边界可以是客观存在的几何表面，也可以是虚拟的表面。反映边

界的尺度可大可小（但均不可至无限），可以是确定的，亦可以是变化的。在热力学中，界定系统的方法通常有两种：控制容积法和控制质量法。控制容积法即是以一定的几何表面（可以是虚拟的）作为边界来界定。如对于一个气缸，气缸的内壁面、活塞内表面以及汽缸的气门上的虚拟表面所围合的空间，就可以作为系统的空间。控制质量法则是以界定系统内一定量的质量的方法实现，如在管道中流动的流体，可以取单位质量的流体作为系统，而不管流体所处的位置和形状。

当整个系统处于一种恒定不变的状况，即不随时间而变化，此时的系统被称为处于平衡态的系统；反之，则称为非平衡态系统。对非平衡态系统的研究是一个非常复杂的学科，本书将不做讨论。

2. 系统的分类

在一般情况下，热力系与外界处于相互作用中，彼此可交换能量及物质，如热和机械功、热和电磁功等各种形式的功。

对于热力系来说，按其与外界进行质量交换的情况可将其分为以下几类。

（1）闭口系（或闭系）：热力系与外界无物质交换，或者说没有物质穿过边界。此时，系统内部的质量保持不变，可作为“控制质量”对待。

（2）开口系（或开系）：热力系与外界有物质交换，或者说有物质穿过边界。这种系统内部的质量可以是变化的，但并非一定是变化的。对这种情况，可以把研究的对象划定在一定的空间范围内，即可以采用控制容积法。

（3）简单热力系：热力系与外界只交换热和一种形式的功（通常是机械功）。

（4）绝热系：系统与外界无热交换。

（5）孤立系：系统与外界既无能量交换又无质量交换。

对于热力系，按其内部状况的不同可分类为：单元系（只包含一种化学成分的物质）、多元系（包含两种以上的物质）；均匀系（即单相系，各部分具有相同的性质）、非均匀系（即复相系）等。

二、状态参数

对于一个确定了系统，要深入对其进行研究，必须用一些参数来描述。描述系统状况的参数被称为状态参数，如温度、压力、容积、内能、焓、熵等。由于状态参数是由系统的状态所确定的，因此，下述说法是等效的。

- f 是状态参数
- 过程积分 $\int_a^b df$ 与从 a 到 b 所经历的过程无关
- 封闭积分 $\oint df = 0$
- $\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)$

按参数是否与质量有关，状态参数可分为尺度量和强度量。尺度量即为与质量有关的状态参数；反之则为强度量。

(1) 温度：反映物体（或系统）冷热程度的物理量，符号为 T 或 t 。 T 表示热力学温度， t 表示摄氏温度，单位分别是 K 和 $^{\circ}\text{C}$ 。两者间的关系为

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

(2) 压力：单位面积上所受的力。符号为 p ，其单位为 Pa， $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。由于该单位比较小，所以过去曾常采用另一单位 bar， $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 。

(3) 容积：度量系统所占几何空间的大小的物理量。符号为 V ，其单位为 m^3 。系统单位质量所具有的容积称为比容，记为 v ，其单位为 m^3/kg 。

(4) 热力学能（习惯称为内能）：系统内分子的平均动能和

平均势能之和，反映系统内部的能量状况。记为 U ，单位为 kJ 。系统内单位质量的内能称为比质量热力学能（也称为质量内能）或比热力学能（比内能），记为 u ，单位为 kJ/kg 。

(5) 焓：以数学表达式表示的状态参数。记为 H ，单位为 kJ 。

$$H = U + pV \quad (1-2)$$

显然，系统内单位质量的焓定义为比焓 h ，单位为 kJ/kg ，有

$$h = u + pv$$

(6) 熵：以数学表达式表示的状态参数。记为 S ，单位为 $\text{kJ}/^\circ\text{C}$ 。

$$dS = (dU + pdV)/T \quad (1-3)$$

同样，对于比熵 s ，单位为 $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ ，有

$$ds = (du + pdv)/T$$

对于后两个状态参数，定义是由数学式引出，其物理意义将在后面做出介绍。

三、平衡状态

实际工业过程中的系统绝大多数均为处于平衡态的系统，或可近似看做平衡态。在平衡态的条件下，系统的状态具有可描述性。需要指出的是，处于平衡态的系统内部空间中各位置上的不同状态参数不随时间变化，并非意味平衡系统内部的状态参数必须均匀。只有对于某些特定条件下的系统，处于平衡态即意味着系统内部的状态参数均匀。

处于平衡状态下的系统有很多应用实例。如果把火力发电系统简单化，它可以分为如下几个部分：锅炉、气轮机组、冷却池和加压水泵，由于整个系统连续工作，工况稳定，即各工艺点的参数基本保持不变，因而整个系统可认为处于平衡状态。

四、状态方程式与状态参数坐标图

系统的状态用状态参数来描述，这些参数从不同的角度来描述系统的某一方面的宏观特性。在若干状态参数中可选定一定数量的参数作独立变量，其余的则为因变量。而确定因变量与独立变量之间的关系，首先应确定处于平衡状态下的独立变量的个数，这取决于状态公理。

1. 状态公理

系统与其外界之间由于不平衡势的存在将产生相互作用（即相互的能量交换），这种相互作用以系统的状态变化为标志。每一种平衡将对应一种不平衡势的消失，从而可得到一个确定的描述系统平衡特性的状态参数。由于各种能量交换可以独立地进行，这就有理由相信决定平衡系统状态的独立变量的数目应等于系统与外界交换能量的各种方式的总数。

对于组成一定的闭系而言，与外界的相互作用除了表现为各种形式的功的交换外，还可能表现为交换热量。因此，对于组成一定的闭系的给定平衡状态而言，可用 $n+1$ 个独立的状态参数来限定它。这里 n 是系统有关的准静功形式的数目，“1”是考虑了系统与外界的热交换。此说法在热力学中称为状态公理。

对于简单可压缩系而言，由于只存在压差作用下的容积变化功一种形式，根据状态公理，决定简单可压缩系统平衡状态的独立参数只有 $n+1=2$ 个。

2. 纯物质的状态方程式

任何物质如果其组成是同一的，其化学结构是处处一致的，则此物质称为纯物质。

对于纯物质所构成的简单热力系，根据状态公理其独立的状

态参数只有两个。原则上可以选择任意一对独立状态参数作自变量，其余参数则为因变量，所以

$$x = f(x_1, x_2)$$

但通常在选择自变量时，应选择那些容易测量得到的参数，如 p , v , T 中可任意选取一对

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

$$u = u(p, T)$$

状态方程式也可写成隐函数的形式

$$f(x_1, x_2, x_3) = 0$$

各种不同的物质存在不同的状态方程式，它是物质个性的体现，也反映了参数之间的相互制约。而状态方程式的具体形式，则有赖于实验及物质结构的认识来确定。

3. 状态参数坐标图

简单可压缩系具有两个独立变量，而其他的参数均可作为其函数，因而当这两个独立变量的数值确定时，系统的整个平衡状态也就确定了。如果以两个独立变量作为二维平面坐标系的坐标，显然，该坐标系上的点就代表了系统所处的平衡状态。

需要指出的是，只有平衡状态才能用状态坐标图上的点来表示。不平衡状态由于没有确定的热力状态参数，无法在图上表示。

五、热力过程与可逆过程

任何处于平衡态的热力系统，由于驱使其状态变化的一切不平衡势都不存在，所以其平衡态不可能自发破坏。但系统所处的外界条件发生变化，而使系统与外界之间产生不平衡势，则在此不平衡势推动下将发生能量传递、转换、相互作用以及系统状态的变化，这种系统状态的连续变化过程称为“热力学过程”，简

称为“热力过程”或“过程”。

1. 准平衡过程

在不平衡势推动下，系统状态会发生连续的变化，如果在这样的一个过程中，系统所经历的状态都是平衡态，或都可以近似为平衡态，则该过程称为“准平衡过程”。

热力系实施准平衡过程的条件是：推动过程进行的不平衡势差为无限小。

在准平衡过程中，由于热力系所经历的每一状态对平衡状态的偏离均为无限小，所以，准平衡过程在状态坐标图上可用连续曲线表示。不平衡过程由于其所经历的状态没有确定的参数，故不可能在状态坐标图上全部地表示出来。

任何实际过程都是在有限势差作用下进行的，因而都是不平衡过程。所谓的准平衡过程只是对一些偏离理想的准平衡过程比较小的实际过程才有意义。

2. 可逆过程

当一个系统在经历了一个过程之后，如果系统还能沿着原来的路径返回到起始状态，并且不给外界留下任何影响，则这一过程称为“可逆过程”。可逆过程不存在任何实际的例子，但可以通过与可逆过程相对的概念“不可逆过程”来说明。不可逆过程的例子有：摩擦生热、从高温向低温传热、分子的扩散、流体流动中位能的变化、炸药的爆炸、人员队列的有序变无序等过程。从严格的意义上说，任何的实际过程均是不可逆过程，引入可逆过程的意义主要在于利用这样的理想虚拟过程提供解决问题的方法。因为在许多理论问题的处理上，都需要把问题简化才能得到结果，引入可逆过程就可以简化问题，而得到的结果却可以用于实际过程。

第二节 热力学第一定律

热力学第一定律的本质就是能量守恒定律。虽然这一陈述很简单,但是该原理的广泛使用实际上可能是十分复杂的,必须仔细地识别一个过程中所涉及的各种能量,即使识别出了各种能量,问题的分析还可能是十分复杂的。根据热力学第一定律对各系统的分析,就可得到计算各种能量数值和能量取得平衡时的方程。

第一定律可由各种方程式来表示,但值得注意的是:所有的解释形式仅仅是物理原理的数学表述,守恒概念是一个最基本的概念,如果在分析过程中出现了不确定之处,就应对分析过程进行检查,以确保所做的分析符合这一物理原理。

一旦第一定律用解释式表示出来,就能立刻应用于人们所关注的特定工程系统。在研究能量守恒原理应用时,为了研究在工程应用中所遇到的各种过程,介绍一些有关的参数及其相互关系是有必要的。

一、功

功定义为力作用于一定距离所消耗的能量,在数学上可表达为

$$W = \int_c \mathbf{F} d\mathbf{r} \quad (1-4)$$

式中力矢量和微元位移矢量的点乘表示,计算功时只要考虑位移方向上的分力。当力和位移矢量的方向相同时,得到正功,当它们方向相反时,得到负功。

式1—4是功的基本解析定义,而且可以用该式来计算功。但在实际过程中,功的计算还是要具体化的。在工程热力学中,所考虑的功的主要形式是体积变化产生的功,称为膨胀功或压缩功,在大多数工业过程中,这种功的形式也占据了主要的地位。在这种情况下

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-5)$$

从功的形式上可见,功是一种可以穿过系统边界的能量形式。作为在改变体积的系统所表现的功,必须要有系统与环境之间的力的相互作用。另一方面,由于系统从一种状态变到另一种状态时才能观察到功,因此,功是一个过程量。为此,上式只能对于可逆过程适用。对于不可逆过程则应减去不可逆因素所产生的功耗 W_g , 即

$$W = \int_{v_1}^{v_2} p dV - W_g \quad (1-6)$$

二、热力学能 (内能)

内能是热力学论述中一种具有普遍意义的能量形式。就本质来说,系统的内能应为组成系统的内部分子所具有的平均动能、平均势能的总和。但内能作为一个参数的提出,则是通过实验所得到的。对于一个经历循环的系统,可以发现,不管所经历的循环性质如何,加入到系统中的热量 $\oint dQ$ 在数值上恒等于系统所做的功 $\oint dW$ 。这就反映,必然存在一个参数 U 使得 $dU = dQ - dW$, 并且 $\oint dU = 0$ 。显然,参数 U 符合状态参数的特征,应是一个状态参数,被称为内能。

内能作为一个状态参数,反映了储存在系统内部的能量状

况，与系统的外部储能不同，它不能直接被测量。对于外部储能来说，系统的重力势能变化可表示为将系统提升到一个特定参考水平以上高度所需的功。

$$E_p - E_{p_0} = mgh - mgh_0 \quad (1-7)$$

这里的 m 为系统的质量， g 为当地重力加速度， h_0 为参考点的高度。显然系统的势能可通过系统所处高度得到反映。

而对另一种外部储能，系统宏观的运动动能变化，则可通过系统的宏观运动速度描述。

$$E_{k_2} - E_{k_1} = \frac{1}{2} m (c_2^2 - c_1^2) \quad (1-8)$$

式中， c_1 、 c_2 分别为系统运动过程的初始速度和终速度。

与内能不同，系统的外部储能反映的是系统的外部能量水平。通常，并不把它们看做系统的状态参数，尽管它们也符合循环积分为零的特征。

而系统的内能，由于包含了系统内部的分子运动和势所产生的能量和其他实际可能存在的能量形式，如化学能、电能、磁能和核能，所以系统的内能函数可表达为

$$E = U + E_k + E_p + E_{ch} + \dots \quad (1-9)$$

式中， E_k 、 E_p 并非系统的整体运动动能和重力势能，而是系统内部相对运动产生的动能和势能； E_{ch} 为化学能。

三、热与比热容

与功的定义类似，热也是系统与其环境之间的一种能量的相互作用。然而，这种能量的相互作用不能像功那样由力作用一定距离来计算。因此，热和功本质上是不同类型的能量。在直观上，我们把热与系统的温度联系在一起，因为给系统加热时，一般情况下系统的温度是升高的。这里所说的给系统加热并非是把热作为一种“特殊的物质”加到系统中去，因为热并不存在于系